

Elisa Suvanto

# Rakennusosien liitosten muodostamat kylmäsil- lat ja niiden lisäkonduktanssien laskenta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

3.4.2013

## **Alkusanat**

Tämä insinööritö tehtiin A-insinöörit Suunnittelu Oy:lle. Haluan kiittää yritystä mielenkiintoisesta insinööritö aiheesta sekä työssä mukana olleita ohjaajiani teknistä johtajaa Olli Saarista ja yksikönjohtajaa Juha Elomaata. Erityisesti haluan kiittää Jarkko Piirosta aktiivisesta ohjauksesta ja lukuisista neuvoista työn eri vaiheissa. Kiitos myös Metropolia ammattikorkeakoulun puolesta työni ohjaajana toimineelle Hannu Hakkaraiselle.

Lisäksi haluan osoittaa suurta kiitosta perheelleni ja läheisilleni kannustuksesta, tuesta ja ymmärryksestä insinööritöni sekä opintojeni eri vaiheissa.

Espoossa 3.4.2013

Elisa Suvanto

<p>Tekijä(t) Otsikko</p> <p>Sivumäärä Aika</p>	<p>Elisa Suvanto Rakennusosien liitosten muodostamat kylmäsilat ja niiden lisäkonduktanssien laskenta</p> <p>44 sivua + 6 liitettä 3.4.2013</p>
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	<p>Tekninen johtaja Olli Saarinen Yksikönjohtaja Juha Elomaa Suunnittelija Jarkko Piironen Yliopettaja Hannu Hakkarainen</p>
<p>Tämä työ tehtiin A-insinöörit Suunnittelu Oy:lle. Vuonna 2012 muuttuneiden uudisrakentamisen energiamääräyksien myötä rakennusten energiatarkasteluissa siirrytään rakennuksen kokonaisvaltaisempaan tarkasteluun. Muutosten myötä rakennusten johtumislämpöhäviöiden laskennassa tulee huomioida yksittäiset rakennusosien väliset kylmäsilat niiden lisäkonduktanssien avulla. Työ tehtiin perehtymällä rakennusfysiikkaan liittyvään kirjallisuuteen sekä aiheeseen liittyviin Suomen rakentamismääräyskokoelman osiin ja eurooppalaisiin standardeihin.</p> <p>Työssä tutkittiin rakennusosien välisten kylmäsiltojen vaikutusta rakennuksen vaipan johtumislämpöhäviöihin ja määritettiin laskennallisesti niiden aiheuttamaa lisälämpövirtaa eli liitoksen lisäkonduktanssi. Työssä tutkittiin myös WUFI 2D -ohjelmiston käyttökelpoisuutta liitosten lisäkonduktanssien laskentaan sekä muutaman markkinoilla olevan ilmaisohjelman käyttökelpoisuutta lisäkonduktanssien laskentaan. Laskennallisessa osuudessa keskityttiin rakenneliitoksiin, jotka ovat tyypillisiä ja yleisimpiä liitoksia uusissa toimitila- ja teollisuuskohteissa. Lisäksi tutkittiin rakenteita, joille ei ole toistaiseksi annettu valmiita taulukkoarvoja materiaaliensa mukaan.</p> <p>Laskennan tuloksena saatiin viidelle eri liitostapaukselle lisäkonduktanssin lukuarvot WUFI 2D -ohjelmalla. Saatuja lisäkonduktanssin lukuarvoja verrattiin taulukkoarvoihin ja arvioitiin kuinka suurta hyötyä liitosten lisäkonduktanssien tarkemmalla määrittämisellä saavutettaisiin rakennuksen johtumislämpöhäviötä ajatellen.</p> <p>Saadut lisäkonduktanssin lukuarvot olivat pääasiassa pienempiä kuin vertailuarvoina käytetyt vastaavien liitostapausten taulukkoarvot. Laskennan voidaan todeta onnistuneen luotettavasti kahta liitosta lukuun ottamatta. Lisäkonduktanssien tarkemmalla määrittämisellä saavutettava hyöty on laskelmien perusteella kuitenkin melko vähäistä suhteessa siitä saavutettavaan hyötyyn johtumislämpöhäviöiden pienentämisestä ajatellen. Tarkempi lisäkonduktanssien määrittäminen geometrialtaan yksinkertaisissa rakennuksissa ei ehkä ole ensimmäinen keino johtumislämpöhäviöiden pienentämiseksi, mutta monimuotoisissa rakennuksissa vaikutus on oletettavasti merkittävämpi. On myös huomattava, että valmiiden taulukkoarvojen käyttö on verraten helppoa.</p>	
Avainsanat	Kylmäsilta, viivamainen lisäkonduktanssi, rakenneliitos, lämpöhäviö

Author(s) Title Number of Pages Date	Elisa Suvanto The cold bridges formed in structural joints and calculation of their linear thermal transmittance 44 pages + 6 appendices 3 March 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Olli Saarinen, Technical Director Lic. Sc Juha Elomaa, Unit Director M. Sc Jarkko Piironen, Structural Engineer M. Sc Hannu Hakkarainen, Principal Lecturer
<p>This thesis was made for A-Insinöörit Suunnittelu Oy. In the year 2012 energy regulations in the new building field changed, and these regulations lead towards more comprehensive building examinations. These new energy regulations dictate that heat loss through structural joints must be taken into account in the total heat loss calculations of a building. This thesis begins by studying literature about building physics and observing building regulations in Finland and European standards.</p> <p>In this thesis, cold bridges formed in structural joints and calculations of their transmittance are examined, and the effect of cold bridges when calculating heat loss of a building is studied. Calculations were made by WUFI 2D –program and this thesis also examines the usability of a few freeware softwares. The calculation part was chosen to concentrate on typical structural joints of office premises and industrial buildings. Also, some structural joints were chosen which do not yet have listed tabled values in building regulations according to the materials of their joining structures.</p> <p>As a result of the calculations, linear thermal transmittance for five different structural joints from WUFI 2D –program were obtained. The obtained linear thermal transmittances were compared to table values which are found in building regulations. Calculated thermal transmittance values were evaluated for how much benefit they will bring with reference to the heat loss of a building if the heat loss through thermal bridges formed in structural joints are calculated precisely by the program.</p> <p>The obtained linear thermal transmittances for calculated structural joints were mainly smaller than the listed values in building regulations. Calculations were successful for three calculated structural joints. For two structural joints the results were not reliable and those two would need more accurate examinations. Calculation results showed that the benefit of precise calculations of structural joints is quite small. Precise calculation of joint heat loss is not probably the most cost efficient way to reduce the total heat loss of a building. Other measures should be implemented before resorting to detailed calculation. It is important to also notice that calculation by WUFI 2D -program is quite labor intense, compared to using tabled values in building heat loss calculations.</p>	
Keywords	Thermal bridge, linear thermal transmittance, structural joint, heat loss

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Muutokset uudisrakentamisen energiamääräyksissä	3
2.1	Ympäristöministeriön ohjeet	3
2.2	Eurooppalaiset standardit	4
3	Kylmäsilta	5
3.1	Lämmönjohtuvuus kylmäsilloissa	7
3.2	Lisäkonduktanssi	8
3.3	Kylmäsilat rakenteissa	8
4	Rakennuksen lämpöhäviöiden laskenta	9
4.1	Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt	11
4.2	Kylmäsiltojen osuus rakennusvaipan johtumislämpöhäviössä	11
5	Viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen	13
5.1	Lisäkonduktanssin laskentaperiaate	14
5.2	Todellisen rakenteen lämpötekniinen kytkentäkerroin	16
5.3	Taulukkoarvot	16
5.4	Valmistajien ilmoittamat viivamaisten lisäkonduktanssien arvot	18
5.5	Lisäkonduktanssin laskenta ohjelmilla	18
6	Mallinnuksen ja laskennan eteneminen	19
6.1	Todellinen liitosrakenne	20
6.2	Vertailurakenne	21

6.3	Yksinkertaistettu liitosrakenne	25
6.4	Viivamaisen lisäkonduktanssin laskenta	28
6.5	Tulosten käsittely	30
7	Tutkittavat rakenteet	31
7.1	Tutkittaviin rakenteisiin liittyvät laskelmat ja tulokset	33
7.2	Laskennan tulosten tarkastelu	34
8	Johtopäätökset	36
8.1	WUFI 2D	36
8.2	Ilmaisojelmien käyttökelpoisuuden arviointi	37
8.3	Kuka määrittää liitosten lisäkonduktanssit lämpöhäviölaskentoja varten?	38
8.4	Viivamaisten lisäkonduktanssien määrittäminen vai taulukkoarvot	39
8.5	Työn arviointi	40
9	Yhteenveto	41
	Lähteet	43
	Liitteet	
Liite 1.	US-US 1 Ulkoseinien nurkkaliitos ulkonurkka	
Liite 2.	US-US 2 Ulkoseinien nurkkaliitos sisänurkka	
Liite 3.	US-YP Ulkoseinän ja yläpohjan liitos	
Liite 4.	US-AP1 Ulkoseinän liitos alapohjaan, maanvarainen	
Liite 5.	US-AP2 Ulkoseinän liitos alapohjaan, tuuletettu	
Liite 6.	Vertailurakenteet	

## Lyhenteet ja selitykset

### Adiabaattireunaehto

Laskennassa käytettävä reunaehto, jossa rakennusosan reunalle oletetaan täydellinen lämpöeristys.

### FEM-laskenta

*Finite Element Method* eli elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä.

### Korjattu lämmönläpäisykerroin $U_c$ (W/(m<sup>2</sup>K))

Tarkoittaa rakenneosan lopullista U-arvoa, jota käytetään lämpöhäviöiden laskennassa. Eri alaindeksit tarkoittavat eri rakennusosia. Korjatussa lämmönläpäisykertoimessa on tarvittaessa otettu huomioon korjaustermejä.

### Kytkekerroin $L_{2D}$ (W/mK)

Numeerisesti määritetty liitoksen todellinen lämpövirta.

### Lisäkonduktanssi (W/(m<sup>2</sup>K))

Lisäkonduktanssi kertoo kylmäsiilan aiheuttaman ylimääräisen lämpövirran.

### Primäärienergia

Kuvastaa luonnonvarojen käyttöä, eli jalostamatonta luonnon energiaa mitattuna siinä muodossa kuin se on ennen muunnosprosessia.

## Stationääritila (jatkuvuustila)

Jatkuvuustilassa olevaan systeemiin tuodaan sekä sieltä poistuu vakio-määrä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Jatkuvuustilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.



## 1 Johdanto

Insinööritö tehdään A-insinöörit Suunnittelu Oy:lle. A-Insinöörit on yksi Suomen johtavia rakennusalan asiantuntijoita. Insinööritöön aiheeksi valittiin rakennusosien liitosten muodostamat kylmäsillat ja niiden lisäkonduktanssien laskenta.

Uudisrakentamisen uudet energiamääräykset ja -ohjeet julkistettiin tutustuttavaksi alan toimijoille 30.3.2012 ja ne astuivat voimaan 1.7.2012. Uusien määräyksien tarkoituksena on ohjata energiasäästämiseen sekä hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Määräyksien avulla pyritään kiristämään uudisrakentamisen energiatehokkuusvaatimuksia noin kahdellakymmenellä prosentilla edeltäneeseen vuoden 2010 tasoon verrattuna. Uusien määräyksien avulla halutaan myös yhtenäistää Suomessa tehtäviä rakennusten energiatarkasteluja muiden euromaiden energiatarkastelujen kanssa. [9.]

Keskeisimpänä muutoksena on siirtyminen rakennusten kokonaisenergiankulutukseen perustuvaan säätelyyn jota E-luvulla osoitetaan ja joka kuvaa rakennuksen primäärienergiankulutusta. Tämä tarkoittaa sitä, että nykyisistä rakennusosa- ja järjestelmäkohtaisesti asetetuista vaatimuksista siirrytään rakennuksen kokonaisvaltaiseen tarkasteluun.

Rakennuksen energiantehokkuus on ominaisuus, jolla vaikutetaan kiinteistön arvoon. Sitä hyödynnetäänkin jo nyt kiinteistöjen markkinoinnissa ja osana siinä toimivan tai sen toteuttaneen yrityksen imagoa. Tämä asettaa uusia vaatimuksia rakennusten suunnittelulle ja toteutukselle, mutta samalla kuitenkin lisää innovatiivisempien ratkaisujen luomisen vapautta, sillä energian kokonaiskulutuksen pitää pysyä sille rakennuskohtaisesti asetetuissa rajoissa. Tavoitteiden saavuttamiseksi käytettävät keinot jätetään avoimiksi. Erilaisilla toteutustavoilla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka asetettuihin vaatimuksiin päästään ja tämän seurauksena toimivien kokonaisratkaisujen löytäminen vaatii kokonaisuuden hallintaa eri yhteistyötahojen välillä jo hankesuunnitteluvaiheessa. [1, s. 15]

Muuttuneissa määräyksissä rakennusosien lämmönläpäisykertoimille eli U-arvoille asetetut rajat eivät muutu vuoden 2010 vaatimuksista. Rakennusvaipan lämpöhäviöiden laskennassa otetaan kuitenkin uusien määräyksien myötä huomioon myös rakennusosien välisten liitosten muodostamat kylmäsillat, joiden avulla korjataan rakennuksen

johtumislämpöhäviölaskennassa rakennusosakohtaisten lämmönläpäisykertoimien laskennassa käytettävien reunaehto- ja oletuksien aiheuttamat epätarkkuudet. Nämä rakennusosien väliset kylmäsiilat huomioidaan lisäkonduktanssin avulla, joka ilmaisee kylmäsiilan aiheuttamaa ylimääräistä lämpövirtaa. Määräyksissä on tähän asti otettu ainoastaan huomioon säännölliset kylmäsiilat, jotka sisältyvät jo rakennusosan lämmönläpäisykertoimeen (U-arvo). Määräykset ohjaavat suunnittelijoita kiinnittämään tarkempaa huomiota kylmäsiiloihin aiheuttaviin detaljeihin. Kylmäsiiloille alttiit rakenneliitokset kuten nurkat, ulkoseinä-alapohja, ulkoseinä-yläpohja, ulkoseinä-välipohja sekä ovet ja ikkunat ovat väistämättömiä kaikissa rakennuksissa. Mitä monimuotoisempi rakennus on, sitä enemmän siinä on rakennusosien liitosten muodostamia kylmäsiiloja.

Liitosten väliset kylmäsiilat huomioidaan siis rakennuksen lämpöhäviölaskennassa joko Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeissa annettuja valmiita taulukkoarvoja käyttäen tai käyttäen laskennallisesti määritettyjä arvoja. Taulukkoarvot ovat oletettavasti varmalla puolella ja niitä on tarkemmin taulukoitu ainoastaan yleisimmille puu-, hirs-, betoni-, kevytbetoni-, kevytsorabetoni- sekä tiilirakenteiden välisille liitoksille. Kylmäsiiltojen aiheuttamien lämpöhäviöiden tarkemman laskennallisen määrittämisen tarpeellisuudelle ja kylmäsiilan vaikutuksen suuruudesta rakennuksen lämpöhäviöön ei ole kuitenkaan ole määräyksissä otettu kantaa. Tässä työssä on tarkoitus selvittää, onko tarpeellista määrittää arvot tarkemmin, saavutetaanko sillä merkittävää hyötyä ja kuinka suuresti tällä voidaan vaikuttaa rakennuksen lämpöhäviön suuruuteen?

Tämän työn tavoitteena on selvittää erilaisten rakennusosien liitosten aiheuttamien kylmäsiiltojen vaikutusta. Lisäksi tutkitaan, kuinka paljon kylmäsiiltojen lämpöhäviöiden suuruuteen voidaan vaikuttaa verrattuna valmiisiin Suomen rakentamismääräyskokoelmassa annettuihin taulukkoarvoihin, jos ne määritellään laskennallisesti ja tapauskohtaisesti. Laskennallisessa osuudessa keskitytään rakenneliitoksiin, jotka ovat tyypillisiä ja yleisimpiä liitoksia uusissa toimitila- ja teollisuuskohteissa, sekä pyritään tutki-  
maan rakenteita, joille ei ole toistaiseksi annettu valmiita taulukkoarvoja. Työssä selvitetään myös yrityksen ja suunnittelijan näkökulmasta mahdollisten laskentaohjelmien käyttökelpoisuutta liitosten tarkasteluille.

## 2 Muutokset uudisrakentamisen energiamääräyksissä

Heinäkuussa 2012 voimaan astuneet uudisrakentamista koskevat energiamääräykset muuttavat rakennuksen energiatehokkuuden käsittelyä ja laskentaa merkittäväällä tavalla. Muuttuneiden määräyksien myötä uudisrakennuksille lasketaan kokonaisenergian käyttöä määrittelevä E-luku eli energialuku, joka lasketaan rakennukseen ostettavan energian ja energiamuotojen kertoimen tulona. [15.]

Rakennusten määräystenmukaisuus tulee osoittaa E-luvulla eli energialuvulla ( $\text{kWh/m}^2/\text{v}$ ), jonka tulee alittaa määräyksissä asetettu rakennustyyppikohtainen enimmäisarvo. E-luku on energiamuotojen kertoimilla painotettu ominaisenergiankulutus laskettuna rakennuksen lämmitettyä nettolattianeliömetriä kohti ja se kuvastaa kokonaisenergian laskennallista kulutusta ja primäärienergian käyttöä. Mitä pienempi E-luku on, sitä energiatehokkaampi rakennus on. [1, s. 21; 14]

Rakennuksen lämmitysenergian tarve muodostuu rakennuksen **vaipan lämpöhäviöstä, ilmanvaihdon energiankulutuksesta sekä vuotoilman ja käyttöveden lämmityksestä**. Rakennuksen vaipan hyvä ilmatiiveys ja lämmöneristys ovat nykyrakentamisen lähtökohtia. Muuttuneiden määräyksien myötä rakennuslupahakemusvaiheessa uusille rakennuksille laaditaan energiatodistus, jonka osana lasketaan rakennuksen johtumislämpöhäviöt, joiden yksi vaikuttava tekijä ovat rakennusosien väliset kylmäsilat ja niiden aiheuttama lisä lämpöhäviöön. Muuttuneissa energiamääräyksissä kylmäsilatarkastelut ovat uusi osa rakennuksen lämpöhäviön laskentaa. Rakennusosien liitosten lämpöhäviöt ovat oleellinen osa siirryttäessä rakennusosakohtaisesta tarkastelusta lämpöhäviön kokonaisvaltaiseen tarkasteluun. Enää ei riitä, että U-arvoon sisällytetään säännölliset kylmäsilat, vaan lisäksi on otettava huomioon viivamaiset rakennusosien liittymäkohdat. [1, s. 22-23; s. 60-63]

### 2.1 Ympäristöministeriön ohjeet

Uudisrakentamista koskevat määräykset ja ohjeet ovat jo astuneet voimaan ja korjausrakentamisen määräykset ovat vielä valmistelussa. Tämän työn tekovaiheessa osasta ohjeista ja määräyksistä on julkaistu luonnosversiot, joten niiden sisältö saattaa vielä jossakin määrin muuttua.

Muuttuneiden energiamääräysten myötä Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeista ja määräyksistä on julkaistu uusia versioita. Rakennusosien liitoskohtien aiheuttamat kylmäsillat huomioidaan rakennuksen lämpöhäviölaskennassa, jota käsitellään Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3. RakMK D3 Rakennusten energiatehokkuus määräykset ja ohjeet -osaan on yhdistetty kaikki energiatehokkuuden vaatimukset. Tämä tarkoittaa sitä, ettei muissa RakMK:n osissa ole enää energiatehokkuuden vaatimuksia. RakMK D3:ssa annettuja vaatimuksia ja laskentasääntöjä täydentävät ohjeet RakMK C4 Lämmöneristys ja RakMK D5 Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, jotka ovat täysin uusittuja ja sisältävät vain ohjeita. [8, s. 11]

RakMK D3: Energiatehokkuuden vaatimukset kohdassa 4.3 Rakennusvaipan lämpöhäviöt, jossa käsitellään rakennusosien välisten liitosten viivamaisten kylmäsiltojen vaikutusta. Laskentaa ja vaikutusta johtumislämpöhäviöihin käsitellään tarkemmin RakMK D5:n kohdassa Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta; Tilojen lämmitysenergian tarve. [6, s. 2]

Ympäristöministeriö on lisäksi julkaissut oppaan rakennusosien välisten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan ja määrittämiseen (Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas 24.04.2012). Ohjeessa käsitellään rakennusosien liitoksiin muodostuvien viivamaisten kylmäsiltojen laskennan periaatteita ja esitetään esimerkkejä rakennustyyppien kylmäsilloista ja niihin liittyvien lisäkonduktanssien laskennasta. [7.]

## 2.2 Eurooppalaiset standardit

Muutosten taustalla on Euroopan Unionin vuonna 2002 antama ja vuonna 2010 uusittu sekä hyväksymä rakennusten energiatehokkuusdirektiivi [8]. Se ohjaa mittaamaan rakennusten energiatehokkuutta E-luvulla ja vaatii lähes nollaenergiarakentamista Euroopanlaajuisesti uusien rakennusten osalta. Vuonna 2012 uudistetut määräykset mahdollistavat siirtymän kohti Euroopan Unionin direktiivin edellyttämää nollaenergiarakentamista, mutta todellisuudessa energiatehokkuuden parantaminen nollaenergiatasolle tapahtuu vasta seuraavien uudistusten myötä. Tällöin voidaan kuitenkin keskittyä nykyisten E-lukujen puolittamiseen eikä laskentajärjestelmää tarvitse enää muuttaa. [8, s. 95]

Euroopassa on erilaisia, mutta samaan tavoitteeseen pyrkiviä kansallisia määräyksiä, jotka pohjautuvat eurooppalaisiin EN ISO -standardeihin. Tänä päivänä rakentamisen energiamääräykset asettavat vaatimuksia lähes kaikissa Euroopan jäsenmaissa koskien kylmäsiltoja. Joissain Euroopan maissa on jo tähänkin asti otettu rakennusosaliitosten aiheuttamat kylmäsiljat huomioon laskennassa. Jokaisella maalla on kuitenkin mahdollisuus määritellä itse vaatimukset ja laskentatavat. Joissain Euroopan maissa kylmäsiltojen aiheuttamien lämpöhäviöiden sallitut maksimiarvot määritellään rakennuksen tyypin mukaan ja toisaalla taas rakennusosaliitoksen mukaisesti. [16, s. 3-15]

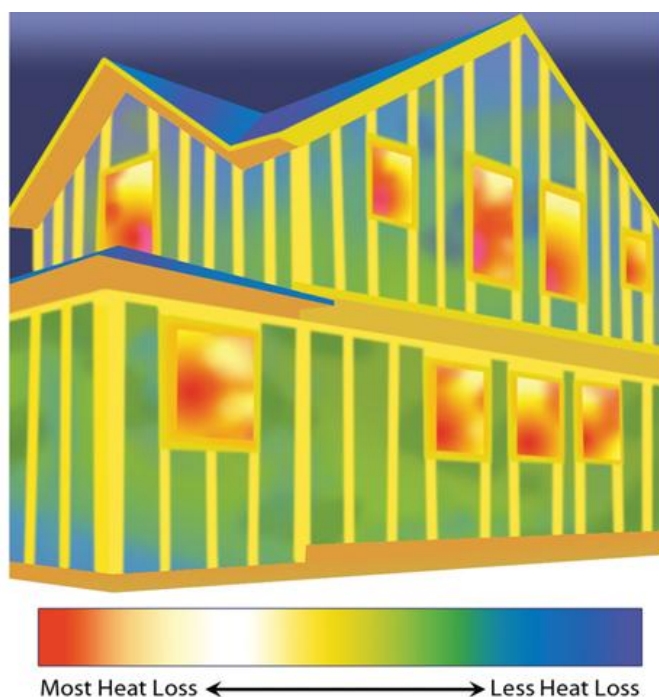
Rakennusosien liitosten muodostamien kylmäsiltojen lisäkonduktanssi on riippuvainen liitoksessa toisiinsa liittyvien rakenteiden mitoista ja niiden lämmönläpäisykertoimista. On syytä huomata, että nämä määritellään eri maiden rakentamismääräyskokoelmissa eri tavoilla. Tämä tarkoittaa sitä, että lisäkonduktanssi ei ole suoraan verrannollinen eri maiden laskentatapojen välillä vaikka lopputuloksena saatava rakennuksen kokonaislämpöhäviöiden summa olisikin sama. Standardissa SFS-EN ISO 14683 annetuissa taulukkoarvoissa tämä on otettu huomioon antamalla taulukkoarvot erikseen kolmelle eri mittajärjestelmälle. [7, s.10; 16]

### **3 Kylmäsilta**

Kylmäsilalla tarkoitetaan rakennusvaipan paikallista rakenneosaa, jossa muodostuu merkittävä lämpöhäviö verrattuna ympäröiviin rakenteisiin. Kylmäsilta on tehty viereisiin rakennusosiin verrattuna hyvin lämpöä johtavasta aineesta ja sen kohdalla lämpötilaeron vaikutuksesta osan pintojen välinen lämpövirran tiheys on jatkuvuustilassa suurempi verrattuna viereiseen alueeseen. Lämpövirran tiheys riippuu pintojen välisestä lämpötilaerosta. [4, s. 4]

Kylmäsilan kohdalla lämpö pyrkii karkaamaan sitä pitkin ulospäin tehokkaammin verrattuna sen viereiseen alueeseen. Rakennusten lämmöneristävyttä parannettaessa kylmäsilan suhteellinen vaikutus rakenteen lämpöhäviöön kasvaa ja kylmäsilta voi häiritä oleellisesti rakenteen toimintaa [1, s. 68]. Lämmöneristepaksuuksien kasvaessa joudutaan käyttämään usein kestävämpiä kannatus- tai sidososia, jotka on pääsääntöisesti valmistettu hyvin lämpöä johtavasta materiaalista (yleensä teräs).

Kuvassa 1 on havainnollistettu tietokonemallinnuksen avulla rakennusosien ja rakenteiden kylmäsilta-vaikutusta. Kuvasta 1 nähdään selkeästi, että rakenteiden liitoksista sekä hyvin lämpöä johtavien materiaalien kohdalta virtaa enemmän lämpöä ulos verraten viereisiin alueisiin. Vastaavanlaisesti todellisesta rakenteesta pystytään havainnoimaan lämpökamerakuvauksen avulla, mistä kohti rakenneosia lämpöä virtaa eniten.



Kuva 1. Rakennusosien kylmäsiltojen vaikutusta havainnollistava kuva [17].

Kylmäsiltojen kautta karkaava lämpö lisää lämmönkulutusta, mutta sen lisäksi kylmäsiltoista aiheutuvat alemmat pintalämpötilat tuntuvat herkästi viihtyvyyden alentumisena. Kylmäsiltojen haittavaikutuksina on paikallinen, ympäristöön verrattuna rakennusvaipan sisäpuolinen alentunut pintalämpötila. Tästä voi pahimmillaan seurata vedon tuntua, pinnan likaantumista, kosteuden kondensoitumista pintoihin tai syvemmälle rakenteeseen sekä pidemmällä aikavälillä voi myös syntyä homevaurioita. [1, s. 68]

Kurnitskin (Energiamääräykset 2012 opas) mukaan liitosten kylmäsiltojen lämpöhäviöt voivat olla jopa yhtä suuria kuin passiivitasen rakennusosien lämpöhäviöt, mikäli liitosten kylmäsiltojen minimointiin ei kiinnitetä riittävästi huomiota [8, s. 61]. Toistaiseksi esimerkiksi seinärakenne on saatu toteutettua helposti siten, että se täyttää sille asetetut U-arvovaatimukset, eikä liitoskohdissa usein esiintyviä rakennusvaipan läpäiseviä rungon osia ole tarvinnut huomioida lämpöhäviölaskennassa. [1, s. 63]

### 3.1 Lämmönjohtavuus kylmäsilloissa

Lämmönjohtavuus ilmoittaa lämpövirran tiheyden jatkuvuustilassa pituusyksikön paksuisen tasa-aineisen ainekerroksen läpi, kun lämpötilaero ainekerroksen pintojen välillä on yksikön suuruinen [4, s. 4].

Lämmönjohtavuus kertoo kuinka hyvin joku materiaali johtaa lämpöä. Mitä suurempi lämmönjohtavuuskyky, sitä paremmin lämpö johtuu. Lämmön siirtyvyys aiheutuu siitä, että lämpötilaerot pyrkivät tasoittumaan eli siellä missä on enemmän lämpöenergiaa, sitä siirtyy sinne missä sitä on vähemmän. Lämmönsiirtyminen tapahtuu siis korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämmön tasoittumisnopeus on verrannollinen lämpötilaeroon. [3, s. 42]

Lämpö on energia, joka johtumalla tai säteilemällä siirtyy systeemin rajapinnan läpi kun rajapinnan eri puolien välillä on lämpötilaero [13, s. 74]. Lämpö siirtyä paikasta toiseen säteilemällä, konvektiolla ja johtumalla. Lämpö siirtyy säteilemällä esim. lämpölaitteen pinnalta lähelle olevaan rakenteen pintaan. Lämmön konvektiolla tarkoitetaan lämmön siirtymistä liikkuvan aineen mukana. Joissakin kirjallisuuslähteissä ilman konvektion vaikutus määritellään kylmäsilaksi, mutta Suomen rakentamismääräyskokoelman osissa ilman konvektiota ei huomioida kylmäsilatarkasteluissa. Kylmäsilloissa lämmönsiirtyminen tapahtuu johtumalla. Johtuminen tarkoittaa sitä, että lämpö siirtyy jonkin aineen läpi kun energiaa siirtyy aineen rakenneosien välisissä törmäyksissä. Lämpöenergian johtuminen tarkoittaa sitä, että energiaa siirtyy aineessa, vaikka ainetta ei siirry ja, jotta lämpöä voi siirtyä johtumalla kappaleesta toiseen on kappaleiden kosketettava toisiaan. Lämpö johtuu aineessa kappaleen lämpimistä kohdista kylmempiin ja lämpimästä kappaleesta sitä koskettavaan kylmempään kappaleeseen tai kappaletta ympäröivään aineeseen. [12, s. 451; 10]

Lämmönjohtumiseen materiaalissa vaikuttaa aineen materiaaliominaisuudet eli materiaalin lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuuteen vaikuttaa osaltaan materiaalin lämpötila ja suhteellinen kosteus. Rakennusosan läpäisevällä teräsosalla on esimerkiksi voimakkaampi kylmäsilta vaikutus verrattaessa puuhun, johtuen sen suuremmasta lämmönjohtavuudesta. Vedellä taas on verrattain suuri lämmönjohtavuus ja tästä syystä märkä puu johtaa paremmin lämpöä kuin kuiva puu.

### 3.2 Lisäkonduktanssi

Lisäkonduktanssilla ilmaistaan kylmäsilan aiheuttamaa ylimääräistä lämpövirtaa [11, s.20]. Lisäkonduktanssit voidaan ilmoittaa joko viivamaisina tai pistemäisinä riippuen sen poikkileikkauksesta suhteessa sen vaikuttamaan pintaan. Lisäkonduktanssi on lukuarvo, johon vaikuttaa kylmäsilan pituus tai lukumäärä ja jonka avulla kylmäsiltojen vaikutus huomioidaan rakennuksen lämpöhäviöiden laskennassa. [4, s. 5]

RakMK C4:n mukaan rakennusosien välinen viivamainen lisäkonduktanssi ilmoittaa rakennusosassa olevan pituusyksikön mittaisen viivamaisen kylmäsilan (esimerkiksi oven karmin tai alajuoksupuun) aiheuttaman lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen. Viivamaisen lisäkonduktanssin tunnus on  $\Psi$  ja yksikkö on W/mK. [4, s. 5]

Pistemäinen lisäkonduktanssi ilmoittaa pistemäisestä kylmäsilasta (esimerkiksi parvekekannake) aiheutuvan lisäyksen jatkuvuustilassa rakennusosan läpi kulkevaan lämpövirtaan, kun lämpötilaero rakennusosan eri puolilla olevien ympäristöjen välillä on yksikön suuruinen. Pistemäisen lisäkonduktanssin tunnus on X ja yksikkö W/K. RakMk ei vaadi pistemäisten kylmäsiltojen huomioon ottamista, eikä tässä työssä ei ole käsitelty pistemäisiä kylmäsiltoja tai niiden lisäkonduktanssin laskentaa. [4, s. 5]

### 3.3 Kylmäsilat rakenteissa

Rakennusten kylmäsilat voidaan jakaa erilaisiin kategorioihin niiden tyyppin mukaan. Kylmäsilat voidaan jakaa säännöllisiin ja epäsäännöllisiin.

Säännöllisellä kylmäsilalla tarkoitetaan rakennesosia, jotka ovat tyypillisiä ja toistuvia koko sen vaipan matkalla. Säännöllisestä kylmäsilasta käytetään myös termiä materiaalin kylmäsilta, sillä korkea lämpöhäviö aiheutuu paikallisesta hyvin lämpöä johtavasta materiaalista. Näitä ovat esimerkiksi tuki- ja runkorakenteet, ansaat, siteet sekä kannakset. Säännölliset kylmäsiltojen vaikutus sisällytetään rakenneosan U-arvoon. [16, s. 7; 4, s. 10]



Epäsäännölliset kylmäsillat ovat mm. rakennusosien liitoskohtia. Epäsäännöllisistä kylmäsilloista käytetään myös nimitystä geometrinen tai rakenteellinen kylmäsilta. Tällä tarkoitetaan rakennuksen vaipan tasaisesta muodosta poikkeavaa rakenneosaa, jotka ovat tyypillisiä rakennuksen liitoskohdissa kuten esimerkiksi ulkoseinän ja siihen liittyvien vaakarakenteiden kuten välipohjan, yläpohjan ja alapohjan, parvekeliitosten sekä rakennuksen nurkkien muodostamat kylmäsillat. Epäsäännölliset kylmäsillat huomioidaan lämpöhäviölaskennassa lisäkonduktanssin avulla. [18; 16, s. 7]

Lisäksi kylmäsillat voidaan jakaa myös niiden poikkileikkauksensa mukaan pistemäisiin ja viivamaisiin kylmäsiltoihin.

Pistemäinen kylmäsilta on paikallisesti vaikuttava kylmäsilta esimerkiksi terässide, joka aiheuttaa lämpövirran lisäyksen rakenteen läpi ja jolla ei ole pinnan suuntaista poikkileikkausta. Viivamaisella kylmäsillalla tarkoitetaan kylmäsiltaa, jonka poikkileikkaus jatkuu samanlaisena vaikuttamansa pinnan suuntaisesti. Viivamaisena kylmäsilta voi toimia esimerkiksi palkki. [4, s. 5]

Lisäksi joissain kirjallisuuslähteissä puhutaan ilman konvektion aiheuttamista rakenteen sisäisistä kylmäsilloista, mutta Suomen rakentamismääräyskokoelmissa ilman konvektiota esimerkiksi rakenteen läpäisevän raon kautta ei huomioida kylmäsilaksi. [16, s. 7]

Tässä työssä on keskitytty rakennusosaliitoksiin muodostuviin kylmäsiltoihin, jotka voivat ovat edellisen listauksen mukaisesti epäsäännöllisiä ja viivamaisia.

## 4 Rakennuksen lämpöhäviöiden laskenta

Lämpöä karkaa rakennuksista pääasiassa neljää reittiä pitkin:

Ulkovaipan liitoksista ja raoista (konvektio)

Ulkovaipan läpi (johtumalla)

Ilmanvaihdon mukana (konvektio)

Viemäristä jäteveden mukana (konvektio). [19.]

Tilojen lämmitysenergian nettotarve koostuu Suomen rakentamismääräyskokoelman D5 viisi mukaan kaavalla 1.

$$Q_{\text{tila}} = Q_{\text{joht}} + Q_{\text{vuotoilma}} + Q_{\text{iv,tuloilma}} + Q_{\text{iv,korvausilma}} \quad (1)$$

$Q_{\text{tila}}$	on tilojen lämmitysenergian tarve, kWh
$Q_{\text{joht}}$	on johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan läpi, kWh
$Q_{\text{vuotoilma}}$	on vuotoilman lämpenemisen lämpöenergian tarve, kWh
$Q_{\text{iv,tuloilma}}$	on tilassa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen lämpöenergian tarve, kWh
$Q_{\text{iv,korvausilma}}$	on korvausilman lämpenemisen lämpöenergian tarve, kWh

Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöiden laskennassa rakennusta tarkastellaan erillisinä rakennusosina ja siihen vaikuttavat vaipan osien pinta-alat ja U-arvot (U-arvolla tarkoitetaan RakMK C4 mukaista korjattua lämmönläpäisykerrointa  $U_c$ ), ikkunoiden koot, rakennuksen muoto ja rakennusosien väliset kylmäsillat. Lämmitysenergian nettotarpeen laskentamenetelmää on käsitelty tarkemmin RakMK D5:ssä, mutta se voidaan myös laskea laskentatyökaluilla tai erilaisilla suunnittelun alkuvaiheeseen tarkoitetuilla yksinkertaisilla menetelmillä, joita on esimerkkien omaisesti laskettu eri kirjallisuuslähteissä kuten esimerkiksi Kurnitskin kirjassa *Energiamääräykset 2012 opas*. [8.]

Tilojen lämmitysenergian nettotarpeen laskentaan tarvitaan rakennusvaipan pinta-alojen ja lämmönläpäisykertoimien lisäksi tiedot ilmanvaihdon ilmavirroista, ilmanvaihdonjärjestelmän käyntiajoista ja ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenoton hyötysuhteesta. [8, s. 29]

Tässä työssä on tutkittu viivamaisten kylmäsiltojen aiheuttamaa lisälämpöhäviötä ja sen vaikutusta rakennusvaipan johtumislämpöhäviöön. Työssä ei ole tutkittu rakennuksen tilojen lämmitysenergian tarpeen laskentaa tarkemmin.

#### 4.1 Rakennusvaipan johtumislämpöhäviöt

RakMK D5 mukaiseen rakennuksen lämmitysenergian nettotarpeen määrittämiseen liittyvä rakennusvaipan johtumislämpöhäviön laskenta on samanlainen kuin lämpöhäviöiden tasauslaskenta, mutta siinä otetaan huomioon rakennusosien liitosten väliset viivamaiset kylmäsillat sekä johtumislämpöhäviöt tiloihin, joiden lämpötila poikkeaa ulkolämpötilasta (esimerkiksi puolilämmin autotalli). Rakennusvaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon lämpöhäviöiden rajoittaminen vertailuarvoilla laskettuun tasoon ei ole muuttunut vuoden 2010 määräyksistä, eli tämä RakMK D3:een perustuva lämpöhäviöiden tasauslaskenta on pysynyt pääosin muuttumattomana. Ainoastaan vaipan ilmanpitävyyden laskennassa on tapahtunut muutoksia. Rakennusvaipan johtumislämpöhäviö lasketaan rakennusosien johtumislämpöhäviöiden summana. Rakennusosakohtaiset johtumislämpöhäviöt saadaan puolestaan kertomalla rakennusosan lämmönläpäisykerroin (U-arvo) sen pinta-alalla. Viivamaiset kylmäsillat huomioidaan laskennassa liitoskohtaisella kylmäsillan vaikutusta kuvaavalla lisäkonduktanssilla, joka kerrotaan kylmäsillan pituudella. Laskennassa voidaan myös huomioida merkittävät pistemäiset kylmäsillat (esim. pilarit) joiden lisäkerroin kerrotaan niiden lukumäärällä. Suomen rakentamismääräyskokoelman laskentaopas D5 velvoittaa kuitenkin ottamaan huomioon vain rakennuksen vaipparakenteiden liitosten muodostamat viivamaiset kylmäsillat ja pistemäiset kylmäsillat voidaan jättää huomioimatta. [6.]

#### 4.2 Kylmäsiltojen osuus rakennusvaipan johtumislämpöhäviössä

Laskentaa varten tarvitaan kaikkien rakenneosien (ulkoseinä, alapohja, yläpohja, ikkunat, ovi) pinta-alat sekä U-arvot. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimet eli U-arvot lasketaan RakMK C4 mukaisesti. RakMK C4 mukaan U-arvolla tarkoitetaan korjattua lämmönläpäisykerrointa. Rakennusosien U-arvot sisältävät säännölliset kylmäsillat. Lisäksi tarvitaan rakennusosien välisten liitosten viivamaiset lisäkonduktanssit ja liitosten pituudet. (ulkoseinä-ulkoseinä, yläpohja-ulkoseinä, välipohja-ulkoseinä, alapohja-ulkoseinä, ovi-ulkoseinä ja ikkuna-ulkoseinä). Rakennusosien pinta-alat ja liitospituudet lasketaan rakenteiden sisämitoilla. [4; 8]

Rakennusvaipan johtumislämpöhäviö lasketaan RakMK D5 mukaan kaavalla 2.

$$Q_{\text{joht}} = Q_{\text{ulkoseinä}} + Q_{\text{yläpohja}} + Q_{\text{alapohja}} + Q_{\text{ikkuna}} + Q_{\text{ovi}} + Q_{\text{muu}} + Q_{\text{kylmäsillat}} \quad (2)$$

$Q_{\text{joht}}$	on johtumislämpöhäviöt rakennusvaipan läpi, kWh
$Q_{\text{ulkoseinä}}$	on johtumislämpöhäviö ulkoseinien läpi, kWh
$Q_{\text{yläpohja}}$	on johtumislämpöhäviö yläpohjan läpi, kWh
$Q_{\text{alapohja}}$	on johtumislämpöhäviö alapohjan läpi, kWh
$Q_{\text{ikkuna}}$	on johtumislämpöhäviö ikkunoiden läpi, kWh
$Q_{\text{ovi}}$	on johtumislämpöhäviö ovien läpi, kWh
$Q_{\text{muu}}$	on johtumislämpöhäviö tilaan, jonka lämpötila poikkeaa ulkolämpötilasta, kWh
$Q_{\text{kylmäsillat}}$	on kylmäsiltojen johtumislämpöhäviö, kWh

Edellä lueteltujen ulkoilmaan rajoittuvien rakennusosien johtumislämpöhäviöt lasketaan RakMK D5 mukaisesti kaavalla 3.

$$Q_{\text{rak.osa}} = \sum U_i \cdot A_i \cdot (T_s - T_u) \cdot \Delta t / 1000 \quad (3)$$

$Q_{\text{rak.osa}}$	on johtumislämpö rakennusosan läpi, kWh
$U_i$	on rakennusosan i lämmönläpäisykerroin, W/(m <sup>2</sup> K)
$A_i$	on rakennusosan i pinta-ala, m <sup>2</sup>
$T_s$	on sisäilman lämpötila, °C
$T_u$	on ulkoilman lämpötila, °C
$\Delta t$	on ajanjakson pituus, h
1000	on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Rakennusosien liitoksiin muodostuvat kylmäsillat otetaan huomioon viivamaisen lisäkonduktanssin  $\Psi$  avulla. Rakennusosien liitosten johtumislämpöhäviöt lasketaan kaavan 4 mukaisesti.

$$Q_{\text{kylmäsillat}} = \sum l_k \cdot \Psi_k \cdot (T_s - T_u) \cdot \Delta T / 1000 \quad (4)$$

$Q_{\text{kylmäsillat}}$	on johtumislämpö kylmäsilltojen kautta, kWh
$l_k$	on viivamaisen kylmäsillan pituus, m
$\Psi_k$	on viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssi, W/(mK)
$T_s$	on sisäilman lämpötila, °C
$T_u$	on ulkoilman lämpötila, °C
1000	on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Rakennusosien lämpöhäviöiden laskennassa rakennusosan reunalle oletetaan täydellinen lämpöeristys (adiabaattireunaehto). Tästä oletuksesta aiheutuva epätarkkuus otetaan huomioon ja korjataan kokonaislämpöhäviöiden laskennassa laskemalla rakennusosien liitosten muodostamat kylmäsillat ja niiden aiheuttamat johtumislämpöhäviöt rakentamismääräyskokoelman osan D5 mukaan. [7, s. 7]

Liitosten välisten viivamaisten kylmäsilltojen lisäksi voi esiintyä pistemäisiä yksittäisiä kylmäsilltoja (esim. pilari), jotka voidaan halutessa ottaa huomioon pistemäisen kylmäsillan lisäkonduktanssin  $X$  avulla. Tässä työssä ei ole käsitelty pistemäisten kylmäsilltojen laskentaa.

## 5 Viivamaisen lisäkonduktanssin määrittäminen

Viivamaisen lisäkonduktanssin  $\psi$  määrittämiseen on valittavissa tarkkuudeltaan erilaisia menetelmiä. Menetelmän valitsemisessa kannattaa pyrkiä huomioimaan kyseisen kylmäsillan merkitys koko rakennuksen tai yksittäisen huonetilan johtumislämpöhäviössä, kuinka paljon liitosta rakennuksessa esiintyy ja saavutetaanko tarkemmalla simuloinnilla merkittäviä etuja. Kylmäsilltoja koskevan standardin SFS-EN ISO 14683 antamat vaihtoehdot ja tyypilliset tarkkuudet laskennalle ovat:

- Numeerinen laskenta  $\pm 5 \%$
- Tyyppirakenteille laskettujen arvojen käyttö  $\pm 20 \%$
- Käsien laskenta  $\pm 20 \%$
- Ohjearvotaulukot  $0\% - 50 \%$ . [7, s. 11]

Tarkimpaan tulokseen taulukon mukaan päästään käyttämällä numeerista menetelmää, jolla tarkoitetaan rakenteiden simulointia siihen tarkoitettun ohjelman avulla. Käsien laskenta on näistä varmasti työläin menetelmä ja tämän päivän tietokoneohjelmien vuoksi sen ei voi olettaa olevan ensisijainen vaihtoehto. Ympäristöministeriön laskentaoppaassa on esitetty mallirakenteiden avulla erilaisten rakennusosaliitosten laskentaperiaatteita ja tuloksia. Tämän työn tarkoituksena on selvittää simulointiohjelman/ohjelmien potentiaalia suunnittelijan näkökulmasta lisäkonduktanssien arvojen määrittämisessä ja verrataan saatuja arvoja valmiisiin taulukkoarvoihin.

Kaksi- ja kolmiulotteisessa geometriassa päädytään lämpövirrantiheyden differentiaaliyhtälöön, jonka ratkaisuun tarvitaan käytännössä numeerisia menetelmiä (esimerkiksi FEM -laskenta (*finite element method* eli elementtimenetelmä). FEM -laskennassa laskenta-alue jaetaan riittävän moneen laskentaelementtiin (riittävän tiheä laskentaverkko) ja ohjelma ratkaisee elementeissä vallitsevien lämpötilojen yhtälöryhmät. Rakennemallin läpimenevät lämpövirrat voidaan laskea pintojen lämpötiloista, kun tuloksena saatava lämpötilakenttä lähenee differentiaaliyhtälön tarkkaa ratkaisua laskentaverkon tihentyessä. Laskenta-alueen reunoille tarvitaan reunaehdot, jotka ovat tavallisimmin ympäröivä lämpötila, pintavastukset sekä rakenteen jatkumokohdan lämpöeristetty reuna eli adiabaatti. [7, s. 12]

Differentiaaliyhtälön ratkaisuun käytettävällä matematiikalla ei ole käyttäjän kannalta juuri merkitystä. Laskentaverkko on tärkeää määrittää riittävän tiheäksi, sillä tulos on riittävän tarkka, kun lämpövirrat eivät enää muutu verkkoa tihennettäessä. [7, s. 12]

## 5.1 Lisäkonduktanssin laskentaperiaate

Lisäkonduktanssin laskentamenettely perustuu standardeihin, rakentamismääräysten osaan C4 sekä ympäristöministeriön laskentaoppaaseen. Laskenta perustuu rakenneliitoksen mahdollisimman tarkkaan numeeriseen laskentaan sekä rakennusosien läm-

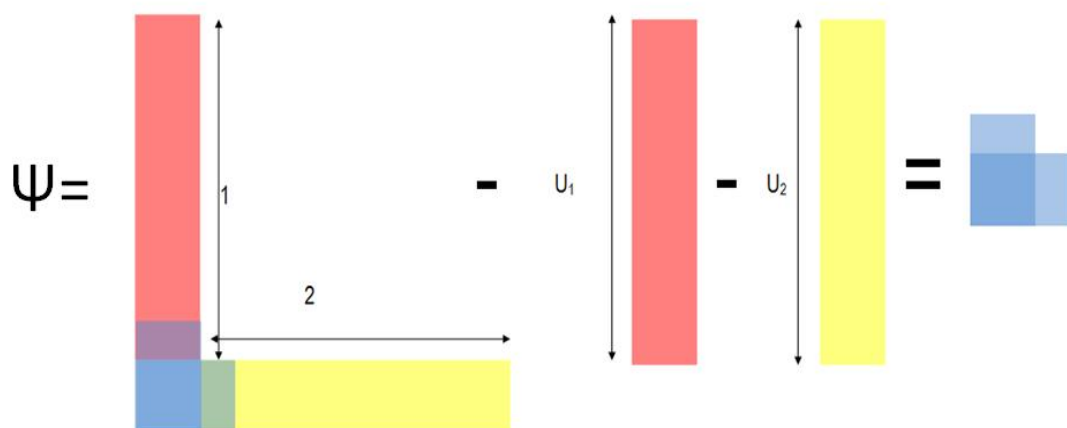
lämmönläpäisykertoimien käyttöön [20]. Jos laskentaan käytettävästä ohjelmasta ei ole mahdollista saada suoraan lisäkonduktanssin arvoa, niin se tulee laskea todellisen liitosrakenteen lämpötekni- sen kytkentäkertoimen ja liittyvän rakenneosan lämmönläpäisykertoimen erotuksena.

Standardissa SFS-EN ISO 10211 on esitetty kaksiulotteisen lisäkonduktanssin kaava muodossa:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \quad (5)$$

$L_{2D}$	on kaksiulotteisella (2D) laskennalla numeerisesti määritetty lämpötekni- nen kytkentäkerroin tarkasteltavalle liitokselle ja liittyville rakennusosille, W(mK)
$U_j$	on liittyvän rakenneosan j lämmönläpäisykerroin, W/(m <sup>2</sup> K)
$l_j$	on mallissa kuvatun rakenneosan j pituus (m), jolla läpäisykerroin- ta $U_j$ voidaan soveltaa.

Kylmäsiilan lisäkonduktanssin arvo saadaan kahden laskentatapauksen erotuksena. Liitoksen lisäkonduktanssi  $\Psi$  (W/mK) on siis todellisen liitosrakenteen lämpövirran ja lämmönläpäisykertoimilla lasketun vertailurakenteen lämpövirran erotus (kuvan 2 mu- kaisesti). Tuloksena saadaan lisäkonduktanssille  $\Psi$  lukuarvo, jonka avulla saadaan laskettua rakennuksen oikea johtumislämpöäviö. [20, s. 13]



Kuva 2. Havainnointikuva lisäkonduktanssin laskennasta

## 5.2 Todellisen rakenteen lämpötekkinen kytkentäkerroin

Viivamaisen kylmäsilan lisäkonduktanssin laskentaan tarvittava liitosrakenteen lämpötekkinen kytkentäkerroin  $L_{2D}$  saadaan simuloimalla liitosrakenne siihen soveltuvalla ohjelmalla ja määrittämällä lämpövirran tiheys liittyvien rakenteiden mittojen mukaisesti. Liitosrakenteen lämpötekkinen kytkentäkerroin muodostuu kaavan 6 mukaisesti.

$$L_{2D} = \sum \Phi_{lj} / (\theta_i - \theta_e) \quad (6)$$

$\Phi_{lj}$  on liittyvän rakenneosan  $j$  lämpövirran tiheys W/m

$\theta_i$  on sisälämpötila, K

$\theta_e$  on ulkolämpötila, K

Liitosrakenteen lämpötekkinen kytkentäkerroin on siis liittyvien rakenneosien lämpövirran tiheyden summa jaettuna lämpötilaerolla kaavan 6 mukaisesti. Liittyvien rakenneosien lämpövirran tiheydet muodostuvat differentiaaliyhtälöstä kaavan 7 mukaisesti.

$$\Phi_{lj} = \int_0^1 q_w \cdot dl_j \quad (7)$$

$q_w$  on liittyvän rakenneosan lämpövirran tiheys W/m<sup>2</sup>

$l_j$  on liittyvän rakenneosan  $l_j$  mitta, m

Lämpötekkinen kytkentäkertoimen laskennassa on huomioitava, että osa laskentaan käytettävistä ohjelmista antaa rakenteen keskimääräisen lämpövirrantiheyden, joten lämpövirran tiheys tulee kertoa erikseen rakenteen pituudella, kun taas osa ohjelmista antaa suoraan lämpövirran tiheyden suoraan mallinnetun rakenteen pituudelle.

## 5.3 Taulukkoarvot

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D5 (luonnosversio 14.03.2012) on esitetty ohjearvoja liitoksissa esiintyville viivamaisten kylmäsiltojen aiheuttamille lisäkonduktansseille, joita voidaan käyttää jos tarkempia suunnitteluarvoja ei ole käytettävissä. Ohjearvojen käytön edellytyksenä kuitenkin, että liitokset on toteutettu hyvän rakentamistavan mukaisesti ja pyrkien minimoimaan liitosalueelle syntyvät kylmäsilat. [5.]



Taulukossa 1 on annettu ohjearvoja ulkoseinän ja yläpohjan, ulkoseinän ja välipohjan sekä ulkoseinän ja alapohjan välisille liitoksille eri runkomateriaaleilla.

Taulukko 1. RakMK D5 mukaiset lisäkonduktanssit ulkoseinän ja ylä-, väli- ja alapohjan liitoksille eri runkomateriaaleilla

	Lisäkonduktanssi $\Psi_k$ , W/(m K)									
	Yläpohjan (ulkonurkka) runkomateriaali			Välipohjan runkomateriaali			Alapohjan runkomateriaali			
	betoni	kevyt-betoni	puu	betoni	kevyt-betoni	puu	betoni, maan-vast.	betoni, ryöm. tila	kevyt-betoni, ryöm. tila	puu, ryöm. tila
betoni	0,08		0,04	0,0			0,24	0,28		
kevytbetoni	0,18	0,06	0,04	0,1	0,0		0,09	0,08	0,03	
kevytsorabetoni	0,13		0,04	0,07			0,15	0,11		
tiili	0,08		0,04	0,0			0,17	0,06		
puu			0,05			0,05	0,10			0,06
hirsi			0,04			0,0	0,11			0,09

Taulukossa 2 on annettu ohjearvoja ulkoseinien välisessä nurkkaliitoksessa sekä ikkuna- ja oviliitoksissa eri runkomateriaaleilla.

Taulukko 2. RakMK D5 mukaiset lisäkonduktanssit ulkoseinän liitoksille eri runkomateriaaleilla

Liitos	Lisäkonduktanssi $\Psi_k$ , W/(m K)					
	Ulkoseinän runkomateriaali					
	betoni	kevyt-betoni	kevyt-sora-betoni	tiili	puu	hirsi
ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	-0,06	-0,05	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05
ikkuna- ja oviliitos, lämmöneristeen kohdalla <sup>a)</sup>	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
ikkuna- ja oviliitos muussa tapauksessa	0,15	0,07	0,10	0,10	0,07	0,07

<sup>a)</sup> Karmi peittää vähintään 40 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta.

Taulukko 3 on tarkoitettu liitoksille, joille ei ole annettu erikseen arvoa taulukoissa 1 ja 2. On syytä huomata, että esimerkiksi teräsrakenteiden liitoksien kylmäsiltojen lisäkonduktanssin ohjearvoina tulee käyttää taulukon 3 arvoja, jos niitä ei erikseen laskennalla määritetä.

Taulukko 3. RakMK D5 mukaiset lisäkonduktanssit liitoksille, joille ei ole annettu arvoja taulukoissa 1 tai 2.

Liitos	Lisäkonduktanssi $\Psi_k$ , W/(m K)
ulkoseinän ja yläpohjan liitos	0,3
ulkoseinän ja alapohjan liitos	0,5
ulkoseinän ja välipohjan liitos	0,2
ulkoseinien välinen liitos, ulkonurkka	0,1
ulkoseinien välinen liitos, sisänurkka	-0,1
ikkuna- ja oviliitos	0,2

RakMK D5 mukaan muut rakenteiden väliset liitokset, joita ei taulukoissa ole erikseen listattuna, voidaan jättää laskennassa huomioimatta. Näillä tarkoitetaan esimerkiksi parvekeliitoksia. [5, s. 19]

#### 5.4 Valmistajien ilmoittamat viivamaisten lisäkonduktanssien arvot

Muuttuneiden määräyksien myötä osa rakennusalan tuoteosavalmistajista ilmoittaa valmiita arvoja myös rakennusosien liitosten lisäkonduktansseille, mutta niiden laskentamenettelystä ei välttämättä anneta tarkempaa tietoa. Saadut lisäkonduktanssien arvot saattavat olla myös laboratorio-olosuhteissa mitattuja eikä käytetyistä materiaaliominaisuuksista ole annettu tarkempia tietoja. Myös tuoteosavalmistajien määrittämiä arvoja voidaan mahdollisuuksien mukaan käyttää, mutta käytetyt arvot olisi syytä olla todennettavissa.

#### 5.5 Lisäkonduktanssin laskenta ohjelmilla

Laskentaan on valittavissa monenlaisia ilmaisia ja kaupallisia ohjelmia, joita on listattuna ympäristöministeriön laskentaoppaassa. Vähimmäisvaatimuksena on, että kaksiulotteinen lämpötilakenttä voidaan laskea jatkuvuustilassa eli vakio-olosuhteissa. Osa ohjelmista soveltuu monenlaisiin tarkasteluihin ja niiden toimivuus on huolellisesti testattu esimerkiksi laboratoriokokein tai standardeissa esitettyjen laskentatapauksien avulla. Erityisesti johtumislämmönsiirtoon tarkoitetut ohjelmat ovat oletettavasti käyttäjystävällisempiä ja osa ohjelmista laskee suoraan viivamaisen lisäkonduktanssin lukuarvon. [7, s. 13]

Osa ohjelmista laskee liitoksen lisäkonduktanssin lukuarvon suoraan lisäksi myös vertailurakenteen U-arvon. Vertailurakenteen U-arvo on syytä laskea samalla ohjelmalla, jolla varsinainen liitosrakenne tullaan laskemaan. Tällä tavoin vältetään mahdollisilta ohjelmien välisiltä eroavaisuuksilta jotka voivat vaikuttaa tuloksiin. Vertailurakenteen U-arvo voidaan myös laskea likimääräisellä käsilaskentamenetelmällä, mutta on huomiotava, ettei sillä välttämättä saavuteta yhtä tarkkaa tulosta kuin liitosrakenteen simuloinnissa. Lisäksi erilaisten laskentatapojen rinnakkaiskäyttö voi osaltaan kasvattaa laskentavirhettä.

A-Insinöörit Suunnittelu Oy:n käytössä on kaupallisista ohjelmista mm. WUFI 2D, jonka soveltuvuutta tässä työssä tutkittiin tarkemmin viiden eri liitostapauksen osalta.

Tässä työssä selvitettiin myös muutaman ilmaisohjelman soveltuvuutta lisäkonduktanssien määrittämiseen.

Työssä testatut ilmaisohjelmat:

- Unorm
- Therm
- KOBRA v3.0W.

## 6 Mallinnuksen ja laskennan eteneminen

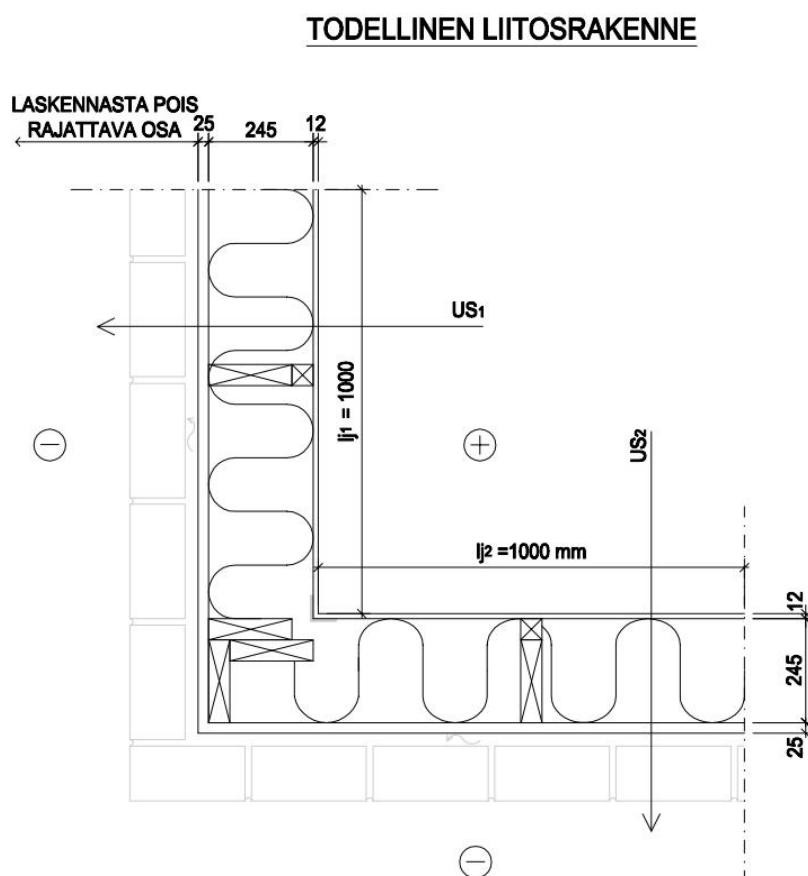
Erilaisten liitostyyppien laskentaperiaatteita on esitetty ympäristöministeriön viivamaisien kylmäsiltojen laskentaoppaassa. Oppaassa esitettyihin laskelmiin on käytetty erilaisia laskentaohjelmia. Tähän on koottu pääpiireittäin yhden esimerkin avulla viivamaisen kylmäsillan lisäkonduktanssin määrittäminen vaiheittain WUFI 2D -ohjelman avulla ja verrattu saatua tulosta laskentaoppaan esimerkkiin sekä taulukkoarvoihin. Esimerkki vastaa laskentaoppaan esimerkkiä ulkoseinien nurkkaliitoksesta (esimerkki kohdassa 6.1.3 Puurankaisten ulkoseinien väliset liitokset).

Rakenteen simulointiin käytettiin WUFI 2D 3.3 -ohjelmaa. WUFI (*Wärme Und FeuchteInstationär* – Läpäisevä lämpö ja kosteus) on IBP:n (*Institut für Bauphysik*) kehittämä rakennusfysikaalinen laskentaohjelma. Ohjelmaa käytetään rakenteiden lämpö- ja kosteusteknisiin tarkasteluihin. WUFI -ohjelmiston suomenkielisen version on tuottanut

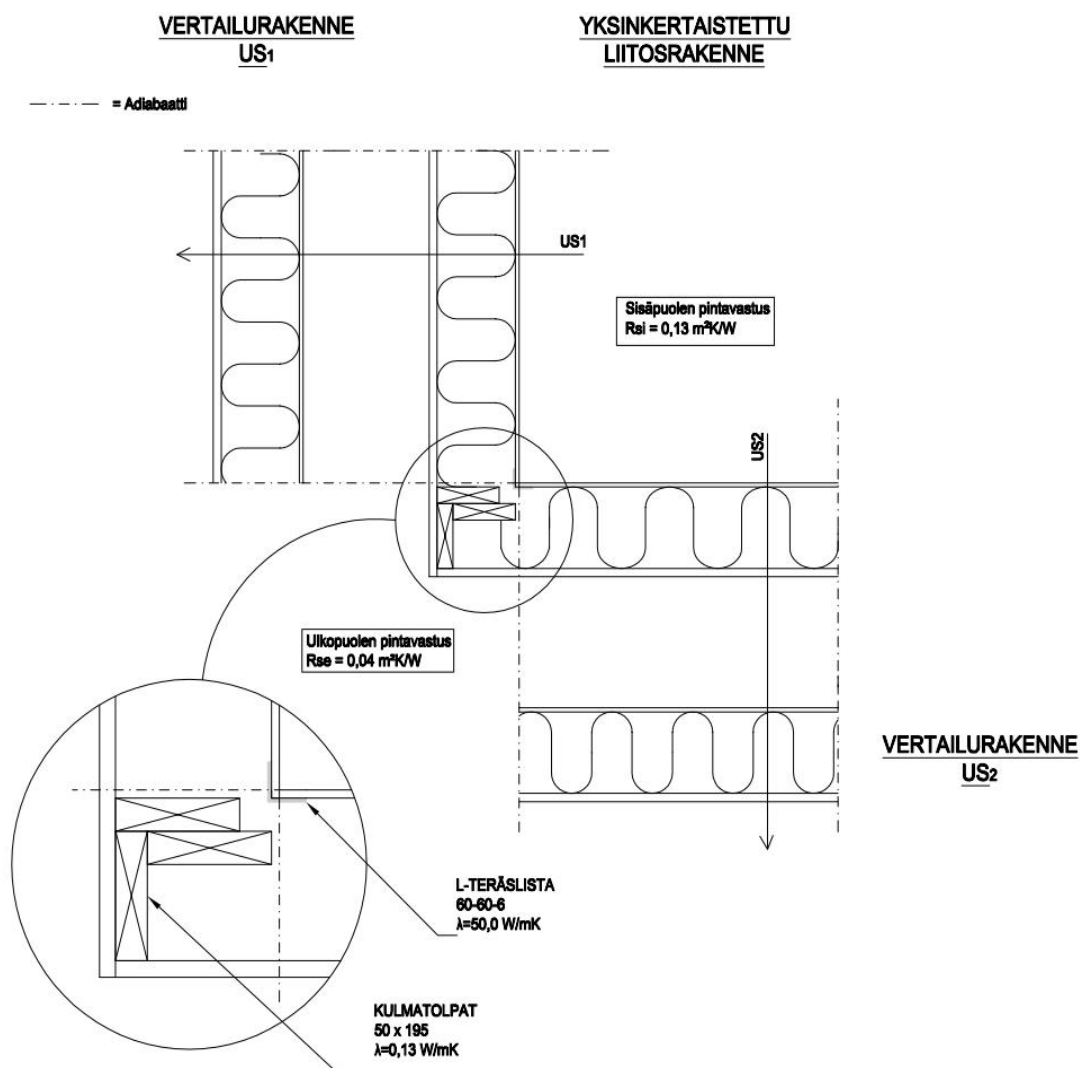
VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka yhdessä saksalaisen *Institut für Bauphysik*i'n kanssa. [21.]

### 6.1 Todellinen liitosrakenne

Todellisesta liitosrakenneesta (kuva 3) muodostetaan yksinkertaistettu liitosrakenne mallinnusta varten sekä vertailurakenne liittyvien rakennusosien U-arvojen laskentaa varten. Tässä esimerkissä rakenne rajataan RakMk C4 mukaisesti siten, että tuuletusraon ulkopuolisia rakenteita ei huomioida. Yksinkertaistetulla liitosrakenneella tarkoitetaan liittyvien rakenteiden ja niiden liitososien riittävän tarkkaa mallintamista, mutta rajaamalla pois rakenneosat sekä alueet, joita ei kylmäsilta tarkasteluissa huomioida ja joilla ei ole vaikutusta liitoksen lämpöhäviöön.



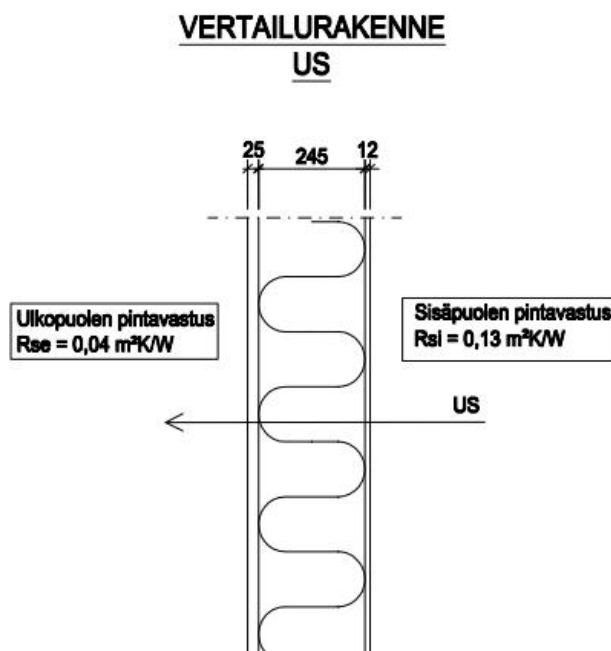
Kuva 3. Todellinen liitosrakenne



Kuva 4. Liitosrakenteen ja vertailurakenteiden muodostus

## 6.2 Vertailurakenne

Vertailurakenteella tarkoitetaan liitoksessa toisiinsa liittyviä rakenteita, joista on rajattu pois rakenteiden liitososat kuvan 4 mukaisesti. Liittyville seinärakenteille lasketaan U-arvot RakMK C4 mukaisesti (kuva 5). Vertailurakenteen U-arvot on syytä laskea samalla ohjelmalla, jolla myös yksinkertaistettu liitosrakenne mallinnetaan. Tällä tavoin vältetään eri laskentatapojen yhdistämisen aiheuttamilta virheiltä, jotka voivat vaikuttaa lopulliseen tulokseen.



Kuva 5. Vertailurakenne, jonka avulla ulkoseinien U-arvot lasketaan

Tässä esimerkkitapauksessa liittyvien seinien rakenteet ovat identtiset. Rakenne ja materiaaliominaisuudet määritellään WUFI 2D -ohjelmaan RakMK C4 mukaisesti. Ulkoseinärakenteen materiaaliominaisuudet on lueteltu taulukossa 4. Rakennetta mallinetaan runkopuujaon mukaisesti 600 mm matkalta (Huom! laskentaoppaassa ei ole otettu kantaa koolausjakoon, oletetaan yleinen runkojako k-600mm). Testilaskentojen perusteella todettiin, että runkopuiden vaikutus on syytä ottaa huomioon käyttäen mineraalivillalle tehollista lämmönjohtavuutta. Runkopuiden vaikutus voidaan laskea mineraalivillan teholliseen lämmönjohtavuuteen ja jättää runkopuut mallintamatta. Tämä johtuu siitä, että varsinaiseen liitosrakenteeseen on vaikea mallintaa runkopuita todellisen sijaintinsa mukaan ja koska runkopuun sijainti erityisesti liitoskohdan lähetyvillä vaikuttaa olennaisesti liitosrakenteen laskentatuloksiin. Runkopuiden mallintaminen omana materiaalinaan vaikutti hieman saatuun U-arvoon ja vertailurakenteen sekä liitosrakenteen seinien U-arvojen on vastattava toisiaan, joten runkopuiden vaikutus huomioitiin mineraalivillan lämmönjohtavuuden arvossa.

Taulukko 4. Ulkoseinärakenteen materiaalitiedot (lueteltuna ulkoa sisälle)

Rakennekerros	Kerrospaksuus $d$ [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R$ [m <sup>2</sup> K/W]
Ulkopuolen pintavastus $R_{se}$			0,04
Tuulensuojalevy	0,025	0,06	
Mineraalivilla + koolaus k600	0,245	0,0475	
Kipsilevy	0,012	0,15	
Sisäpuolen pintavastus $R_{si}$			0,13

Laskentaa yksinkertaistetaan riittävän paljon ja laskennasta poistetaan ominaisuudet, joita ei lämmönläpäisykertoimen määrittämisessä ole tarpeen huomioida. Laskentamallin materiaaleilta poistetaan kosteustekniset ominaisuudet materiaalitaulukosta.

Taulukossa 5 on lueteltu rakenneosien pintavastukset, jotka määritetään RakMK C4 mukaisesti ottaen huomioon käytännössä toteutuvan lämpövirran suunta.

Taulukko 5. Rakenteiden pintavastukset RakMK C4 mukaan

Pintavastus m <sup>2</sup> K/W	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuuntaan	Alaspäin
Sisäpinta $R_{si}$	0,10	0,13	0,17
Ulkopinta $R_{se}$	0,04	0,04	0,04

Tässä esimerkissä on kyseessä nurkan vaakaleikkaus, joten sisäpinnan pintavastukseksi valitaan  $R_{si}=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  ja ulkopinnan pintavastukseksi määritetään  $R_{si}=0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Pintojen lämmönsiirtokertoimiksi määritellään siis  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$  ja  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Rakenteen jatkumokohtiin oletetaan adiabaattireunaehto.

Lämpövirta lasketaan rakenteen läpi sisältä ulos yhden asteen lämpötilaerolla, joten sääolosuhteet (lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus) määritellään vakioksi. Sisäpuo-

len lämpötilaksi määritetään 1 °C (274,15 K) sekä ulkopuolen lämpötilaksi 0 °C (273,15 K).

Laskenta-aika määritetään riittävän pitkäksi siten, että lämpövirta ehtii vakiintua. Tämän esimerkin laskennassa laskenta-ajaksi määritettiin vuosi eli 8760 askelta tuntia. Laskennasta suljetaan pois kaikki kosteustekniset laskelmat.

Simple | Enhanced

Start Date: 1.1.2012 | Time: 0:00 | Number of Time Steps: 8760

**Mode of Calculation**

- ☒ Heat Transport Calculation
- ☐ Laminar Air Flow Calculation
- ☐ Moisture Transport Calculation

**Hygrothermal Special Options**

- ☐ Excluding Heat of Evaporation
- ☐ Excluding Heat of Fusion
- ☐ Excluding Capillary Conduction

**Flow Special Options**

- ☒ Excluding Natural Convection

Acceleration due to gravity

x-direction: 0 [-] (0.00 m/s²) | y-direction: -1 [-] (-9.81 m/s²)

**Numerical Parameters**

- ☒ Increased Accuracy
- ☒ Adapted Convergence

**Adaptive Time Step Control**

- ☐ Enabled
- Steps: 3 | Max. Stages: 5

**Result File contains**

W.C.	R.H.	Temp.	Va.P.	Flu.C.	Flu.D.	Flu.H.	V.X:Y
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kuva 6. Laskenta-ajan ja laskennan parametrien määrittäminen WUFI:ssa

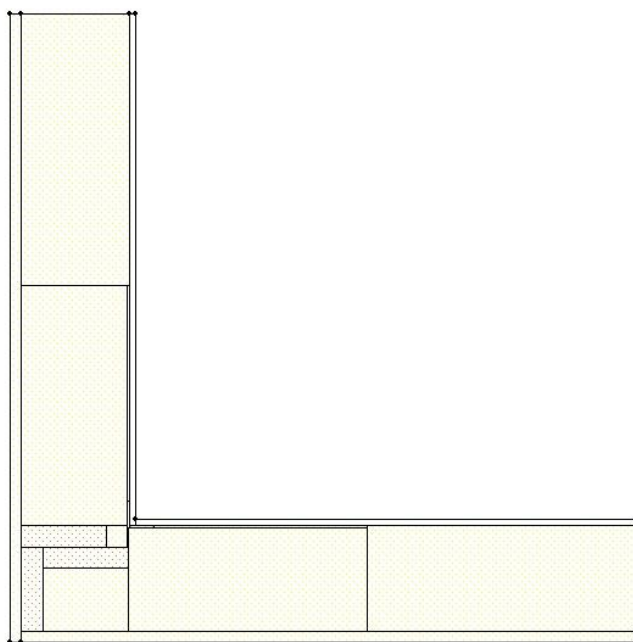
Laskennan jälkeen seinän U-arvo saadaan määritettyä sisäpinnan lämpövirran (*Heat flux density*) avulla mitan  $l_j$  mukaan (ks. kuva 3 s.20). Rakenteen U-arvoksi saatiin laskennassa 0,1718 W/m<sup>2</sup>K. WUFI laskee lämpövirran tiheyden neliötä kohti ja koska



laskennassa sisä- ja ulkopuolen lämpötilaerona oli 1 °C, niin rakenteen U-arvo saadaan suoraan tästä laskelmasta.

### 6.3 Yksinkertaistettu liitosrakenne

Yksinkertaistetun liitosrakenteen (kuva 7) avulla lasketaan lämpövirta koko rakenneliitoksen läpi sisältä ulos ja huomioiden rakenneosien liittyminen toisiinsa. Rakennetta mallinnetaan vähintään yksi metri (1 m) seinän sisäpinnoista. Liitoksen yksityiskohdat tulee mallintaa mahdollisimman tarkasti, jotta kaikki kylmäsilta-vaikutusta tehostavat osat tulee laskennassa huomioitua.



Kuva 7. Yksinkertaistettu liitosrakenne WUFI:ssa

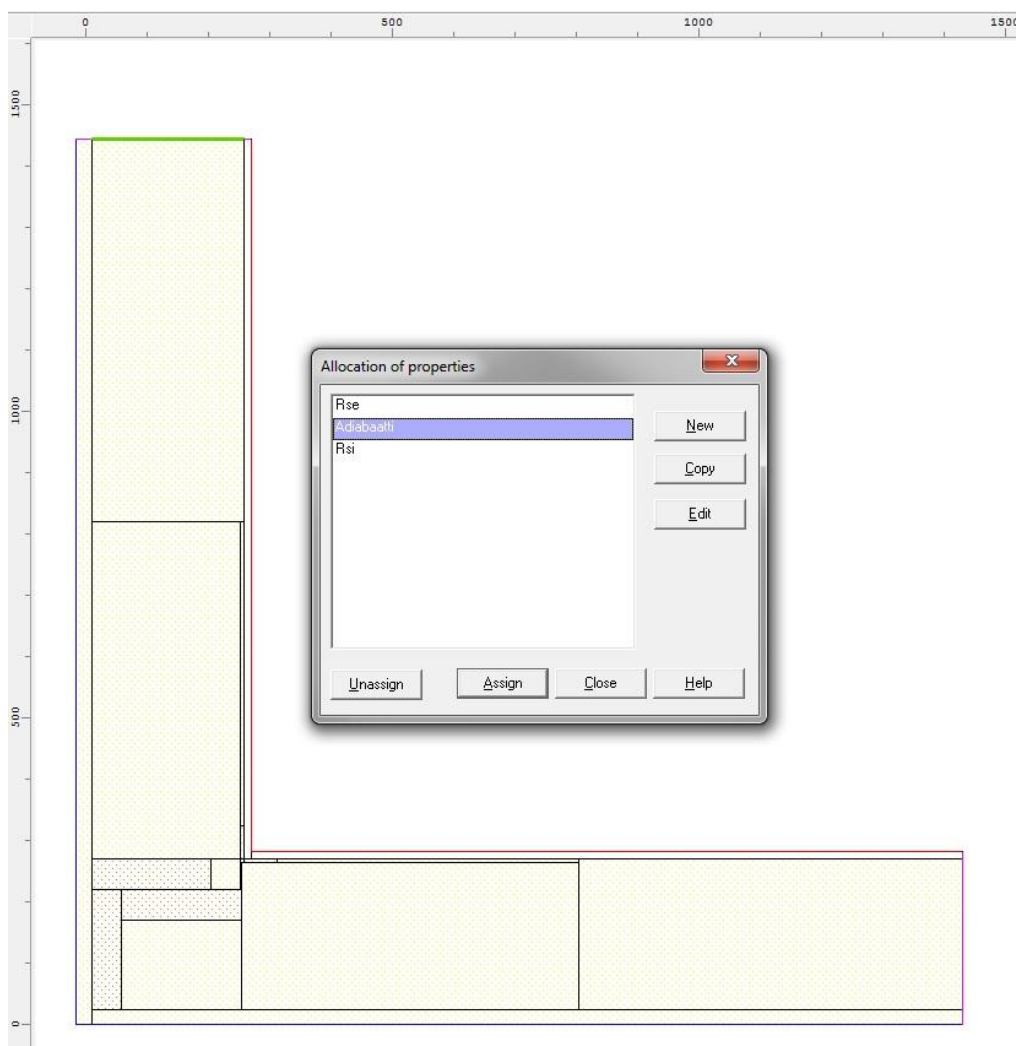
Liittyvien seinien materiaalisominaisuudet tulee määrittää samalla tavoin kuin kohdassa 6.2 käyttäen tehollisia lämmönjohtavuuksia, jotta liittyvien seinien U-arvot vastaavat toisiaan.

Liitoksessa olevien rakenteiden lämmönjohtavuudet (Taulukko 6) määritettiin RakMK viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaisesti.

Taulukko 6. Liitosrakenteiden materiaaliominaisuudet

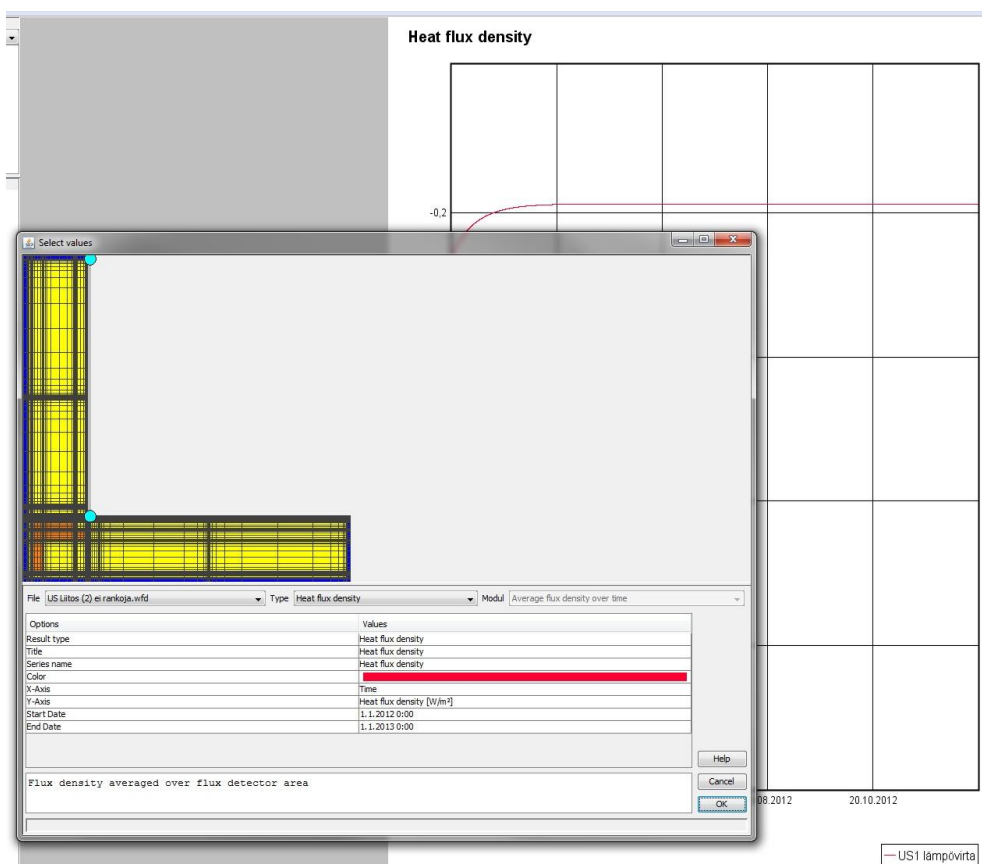
Rakennekerros	Mitat [mm]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]
Kulmatolpat	50×195	0,13
L- teräslista	60-60-6	50,0

Muut laskentaan vaikuttavat reunaehdot määritetään kuten kohdassa 6.2. Kuvassa 8 on havainnollistettu pintavastuksien määrittystä.



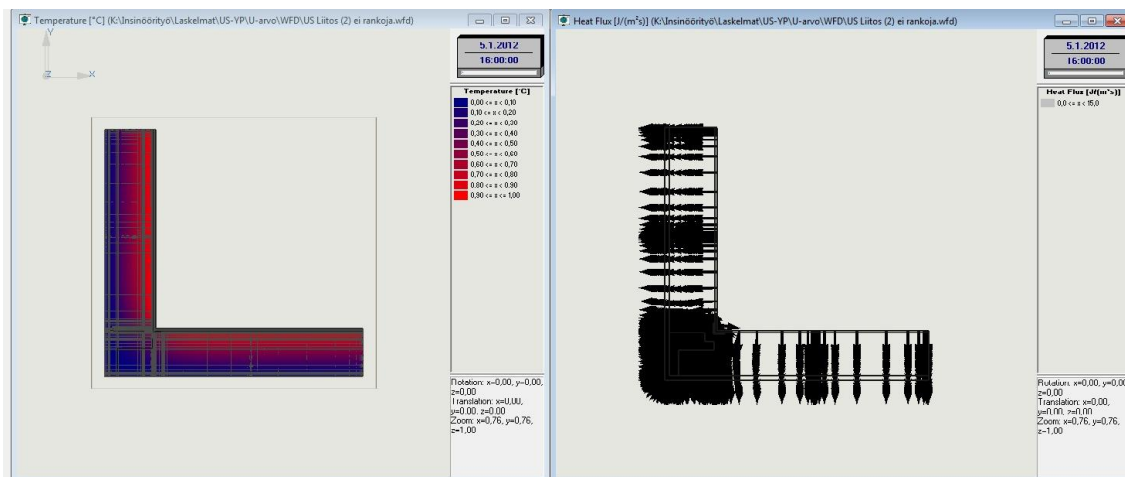
Kuva 8. Mallinnuksen reunaehtojen eli pintavastuksien määrittäminen WUFI:lla

Lämpövirta (*Heat flux density*) määritetään seinien sisäpintojen  $I_1$  ja  $I_2$  mukaisesti (kuva 8). WUFI antaa lämpövirran  $q_w$  yksikössä  $W/m^2$  eli keskimääräisen lämpövirran neliötä kohti. Laskentatulosten tulkinnassa on syytä ottaa huomioon, että WUFI määrittää automaattisesti rakenteen syvyydeksi 1 m (z -suunnassa) riippumatta siitä, onko rakenne 1- tai 2-ulotteinen (xy -tasolla). Lämpövirran lukuarvon suunnan (positiivinen tai negatiivinen) määrää WUFI:ssa rakennemallin sijainti x- ja y -suunnassa suhteessa määritettyyn origoon, joten laskennassa huomioidaan saadun lämpövirran itseisarvo. Tässä esimerkissä lämpövirran arvoiksi saatiin y-suunnassa  $\sim 0,1915 W/m^2$  ja x-suunnassa  $\sim 0,1908 W/m^2$ .



Kuva 9. Lämpövirran tiheyden (*Heat flux density*) määrittäminen WUFI:ssa

Liitosrakenteen mallin lämpövirrat on hyvä tarkistaa WUFI 2D:n videotoinninan (WUFI 2D Motion) avulla, joka kertoo lämpövirtojen suunnat, suuruudet ja kohdat rakenteessa. Videon avulla voidaan tarkistaa, että malli toimii oikein ja lämpöä karkaa kohdasta, josta laskennallisesti on tarkoituskin.



Kuva 10. WUFI:n videotoinninnolla havainnoidut liitoksen lämpötilat ja lämpövirran tiheydet

#### 6.4 Viivamaisen lisäkonduktanssin laskenta

Laskennan tuloksena saatiin WUFI:sta taulukon 7 mukaiset U-arvot vertailurakenteelle sekä liitosrakenteelle taulukon 8 mukaiset lämpövirran tiheydet.

Taulukko 7. Vertailurakenteiden U-arvot WUFI:sta

Rakenne	U-arvo [W/m <sup>2</sup> K]
U <sub>1</sub>	0,1718
U <sub>2</sub>	0,1718

Taulukko 8. Liitosrakenteen lämpövirrantiheydet WUFI:sta

Rakenne	Pituus [m]	Keskimääräinen lämpövirta $\Phi$ [W/m <sup>2</sup> ]	Lämpövirta · l <sub>j</sub> $\Phi$ [W/m]
US <sub>1</sub>	1	0,1915	0,1915
US <sub>2</sub>	1	0,1908	0,1908

WUFI laskee keskimääräisen lämpövirran tiheyden neliötä kohden, joten liitoksen todellinen lämpövirta muodostuu tässä esimerkissä kaavan 7 (sivu 16.) ja kuvan 4 (sivu 21.) mukaisesti.

$$\Phi_{lj1} = \int_0^1 q_{w1} \cdot dl_{j1} = 0,1915 \text{ W/m}^2 \cdot 1 \text{ m} = 0,1915 \text{ W/m}$$

$$\Phi_{lj2} = \int_0^1 q_{w2} \cdot dl_{j2} = 0,1908 \text{ W/m}^2 \cdot 1 \text{ m} = 0,1908 \text{ W/m}$$

$q_{w1}$  on US1 rakenneosan lämpövirran tiheys, W/m<sup>2</sup>

$q_{w2}$  on US2 rakenneosan lämpövirran tiheys, W/m<sup>2</sup>

$l_{j1}$  on liittyvän US1 –rakenneosan sisämitta, m

$l_{j2}$  on liittyvän US2 –rakenneosan sisämitta, m

Puurankaisten ulkoseinien sisäkulman lämpötekninen kytkentäkerroin  $L_{2D}$  määritetään sen jälkeen kaavalla 6 (sivu 16.).

$$L_{2D} = \frac{\sum \Phi_{lj}}{\theta_i - \theta_e} = \frac{(0,1915 \text{ W/m} + 0,1908 \text{ W/m})}{1 \text{ K} - 0 \text{ K}} = 0,3823 \text{ W/mK}$$

$\theta_i$  on sisälämpötila, K

$\theta_e$  on ulkolämpötila, K

Liitokseen muodostuva viivamaisen lisäkonduktanssin lukuarvo  $\Psi$  saadaan laskemalla kaavan 5 (sivu 15.) mukaisesti liitosrakenteen kytkentäkertoimen ja vertailurakenteiden U-arvon erotuksena. Vertailurakenteet ovat tässä esimerkissä identtiset.

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j = L_{2D} - U_{US1} \cdot l_{j1} - U_{US2} \cdot l_{j2} = 0,3823 \text{ W/mK} - 2 \cdot (0,1718 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1,0 \text{ m}) = 0,0386 \text{ W/mK}$$

$U_{US1}$  on ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$U_{US2}$  on ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$l_1$  on ulkoseinärakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

$l_2$  on ulkoseinärakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

## 6.5 Tulosten käsittely

Seuraavassa taulukossa on verrattu yllä WUFI 2D ohjelmalla laskettua arvoa Suomen rakentamismääräyskokoelman viivamaisten lisäkonduktanssien oppaassa laskettuun arvoon sekä RakMK osassa D5 annettuun arvoon vastaavalle liitokselle.

Taulukko 9. Laskennallisesti määritetyn liitoksen lisäkonduktanssin vertailu

Liitos	WUFI 2D Lisäkonduktanssi [W/mK]	RakMK D5 taulu- koidut lisäkon- duktanssit [W/mK]	Ympäristöministeriön Viivamaisten lisäko- duktanssien lasken- taopas [W/mK]
US-US ulkonurkka	0,0386	0,04	0,027

Testilaskelman perusteella voidaan todeta, että WUFI 2D:lla määritetty lisäkonduktanssi arvo on laskentaoppaan vastaavaan esimerkkiä 43% suurempi, mutta verrattuna taulukkoarvoon 3,6 % pienempi.

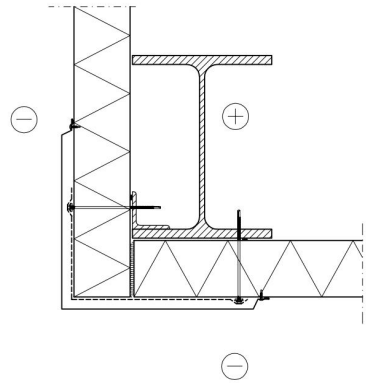
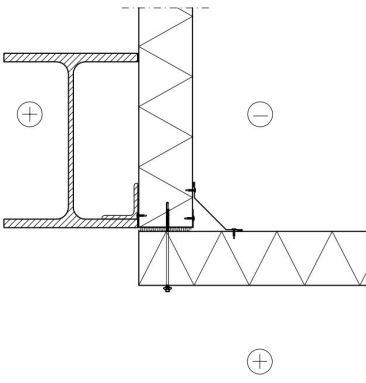
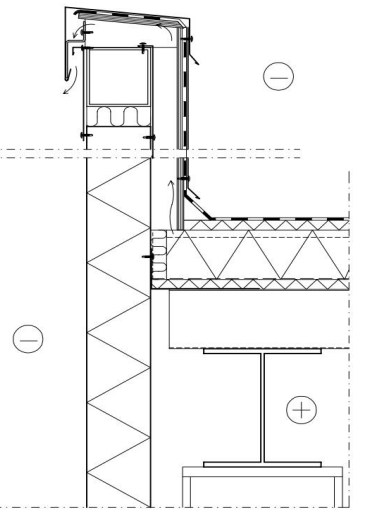
Laskentaoppaan ja yllä lasketun tulosten erot johtuvat osittain laskentaan käytettyjen ohjelmien välisistä eroista. Tulokseen voi osaltaan vaikuttaa myös laskennassa käytetty mineraalivillan ja koolauksen yhdistetty lämmönjohtavuus, joka on laskentaoppaassa lasketussa esimerkissä hieman pienempi mitä on yllä olevassa esimerkissä joka tässä työssä määritettiin RakMk C4 mukaisesti. Laskentaoppaassa vertailurakenteen U-arvo on laskettu käsin ja liitoksen lämpötekniinen kytkentäkerroin ohjelmalla, millä voi myös olla vaikutusta lopputuloksena saatuun lisäkonduktanssiin.

## **7 Tutkittavat rakenteet**

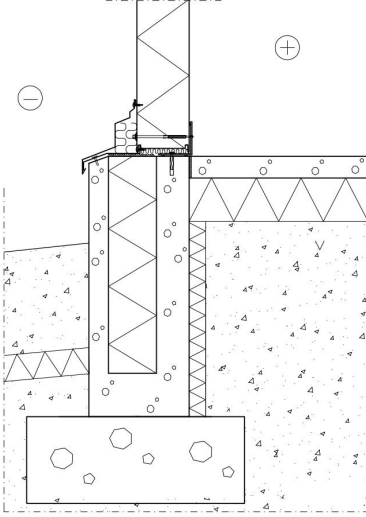
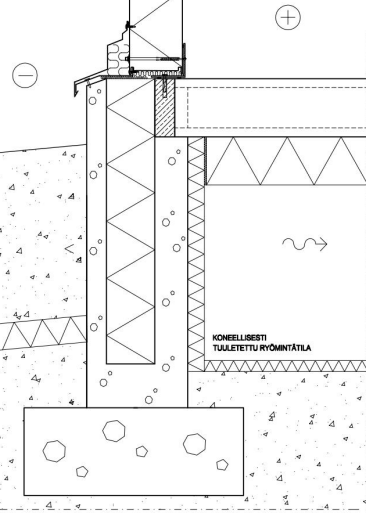
Tämän työn laskennallisessa osuudessa keskitytään rakenneliitoksiin, jotka ovat tyypillisiä liitoksia uusissa toimitila- ja teollisuuskohteissa, sekä pyritään tutkimaan rakenteita, joille ei ole annettu valmiita taulukkoarvoja.

Tässä luvussa on esitelty tutkitut teräsohutlevyelementtien väliset liitokset ja laskennassa mallinnetut yksinkertaistetut liitosrakenteet. Rakenteiden materiaaliominaisuuksina on käytetty eristevalmistajan ilmoittamia arvoja sekä RakMK C4 taulukoituja arvoja. Jatkossa liitostapauksiin viitataan taulukon 10 mukaisilla lyhenteillä.

Taulukko 10. Tässä työssä lasketut liitosrakenteet

Liitos	Liitoksen lyhenne	Rakenne	Liite nro
Ulkoseinän nurkkaliitos ulkonurkka	US-US 1		LIITE 1
Ulkoseinän nurkkaliitos sisänurkka	US-US 2		LIITE 2
Ulkoseinän liitos yläpohjaan	US-YP		LIITE 3



<p>Ulkoseinän liitos alapohja, maanvarainen</p>	<p>US-AP1</p>		<p>LIITE 4</p>
<p>Ulkoseinän liitos alapohja, tuulettuva</p>	<p>US-AP2</p>		<p>LIITE 5</p>

### 7.1 Tutkittaviin rakenteisiin liittyvät laskelmat ja tulokset

Tässä luvussa on koottuna liitosten välisten viivamaisten kylmäsiltojen lisäkonduktanssien laskelmat edellisessä kappaleessa esiteltyjen rakenneosien osalta. Tässä luvussa esitellään ainoastaan laskelmien tulokset ja yksityiskohtaisemmat laskelmat on esitetty liitteissä 1-6. Taulukossa 11 on esitetty koottuna saadut tulokset. Positiivinen arvo kuvaa lämmönsiirtymistä ulospäin.

Taulukko 11. Laskennassa saadut liitosten lisäkonduktanssit

<b>Liitos</b>	<b>Laskennallisesti määritetty lisä- konduktanssi</b>  <b>[W/(mK)]</b>	<b>Taulukkoarvo (RakMK D5 Luon- nos 14.3.2012)</b>  <b>[W/(mK)]</b>	<b>Ero</b>  <b>%</b>
US-US 1	0,0579	0,1	- 42 %
US-US 2	0,0078	-0,1	+ 108 %
US-YP	0,1266	0,3	- 58 %
US-AP1	-0,0105	0,5	-102 %
US-AP2	0,1107	0,5	- 77 %

Laskennassa saatuja lisäkonduktanssien arvoja on verrattu Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 luonnosversion 14.03.2012 ohjearvoihin. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on laskettu saatujen tulosten ero verrattuna valmiisiin taulukkoarvoihin.

## 7.2 Laskennan tulosten tarkastelu

Taulukossa 11 esiteltyjen tulosten perusteella voidaan havaita, että laskennallisten lisäkonduktanssin arvojen ja taulukoitujen ohjearvojen välillä on merkittäviä eroja. Pääosin numeerisesti WUFI 2D -ohjelmalla simuloimalla määritetyt liitosten lisäkonduktanssien arvot ovat pienempiä kuin vertailuarvoina käytetyt taulukkoarvot.

Laskentatapauksissa ei huomioitu sandwich-elementtien teräskiinnikkeiden vaikutusta vertailurakenteiden U-arvossa eikä todellisessa liitosrakenteessa, sillä niiden mallintaminen WUFI:lla olisi ollut haastavaa. Lisäksi elementtien liitoskohtien tiivistysnauhat jätettiin liitosrakenteissa mallintamatta johtuen ohjelman mallinnuksen geometrisistä puutteista. Tiivistystenauhojen poisjättämisellä on luultavasti hieman heikentävä vaikutus

liitoksen toiminnalle. Kaikkien liitosten perusteella voidaan todeta, että WUFI yliarvioi liitoksen vaikutusta kohdissa, joissa ulkoseinäelementin teräsohutelvy ulottuu liitoskohdassa sisältä ulos rakenteen läpi.

Ulkoseinien nurkkaliitoksen osalta voidaan todeta, että US-US 1 -rakenteessa lisäkonduktanssin arvo osuu tarkastelluista rakenteista lähimmäksi vertailuarvoa. Vaikka tapaus oli lähimpänä ohjearvoa niin, silti ero on vertailuarvoon verrattuna noin 42 %.

Sisänurkan US-US 2 liitoksen lisäkonduktanssin arvosta pitäisi ympäristöministeriön laskentaoppaan ja taulukkoarvojen mukaisesti tulla negatiivinen. Edellä lasketussa tapauksessa voidaan todeta, ettei WUFI sovellu kyseisen rakenteen mallintamiseen riittävässä määrin, sillä lisäkonduktanssin lukemasta saadaan positiivinen. Kun vertaillaan sisänurkan liitosta ja ulkonurkan liitosta US-US 1 niin lisäkonduktanssin lukema lähenee arvoa 0, mutta lukema on positiivinen. Tämä voi johtua siitä, ettei WUFI kykene huomioimaan kyseistä liitosta ja liitoksen ominaisuuksia riittävän tarkasti. Tulosten perusteella WUFI yliarvioi liitoksen kylmäsilta vaikutusta.

Ulkoseinän ja yläpohjan liitos US-YP liitoksen osalta tulokseen vaikutti eniten liitoksessa oleva L-teräksen dimensioiden johtuen materiaalin suuresta lämmönjohtavuudesta. L-teräs pyrittiin mallintamaan mahdollisimman tarkasti vastaamaan todellisia mittoja, jotta saatiin mahdollisimman todenmukainen tulos.

Alapohjatarkasteluiden osalta laskenta on huomattavasti monimutkaisempaa ja työläämpää verrattuna muihin liitoksiin. Laskennassa oli väistämätöntä yhdistää huomattavasti enemmän tietokonelaskentaa ja käsin laskentaa. Lisäksi rakentamismääräyskoelman osan C4 Luonnos 16.03.2012 muuttuneet alapohjarakenteiden lämmönläpäisykertoimien laskentamenetelmät ovat monimutkaisia ja työläitä. Lisäksi tietokonelaskennan ja käsinlaskennan yhdistäminen voi lisätä virheiden määrää ja suuruutta. Liitosten US-AP1 ja US-AP2 laskentamalleista voidaan WUFI:n videotoinnin perusteella todeta, että rakenteiden liitoskohdassa tapahtuu suurin lämpövirta. Siitä huolimatta maanvaraisen alapohjan US-AP1 laskennasta saadaan lopulliseksi tulokseksi, ettei rakenteiden liitoskohdassa tapahdu ylimääräistä lämpövirtaa ja lisäkonduktanssin arvo on negatiivinen.

Alapohjarakenteiden osalta laskelmat suoritettiin ohjeiden mukaisesti ja erityisen huolellisesti, mutta tuloksiin vaikuttaa oletettavasti tietokonesimuloinnin ja käsinlaskennan

välttämätön yhdistäminen sekä näiden kahden menetelmän erot tulosten tarkkuuksissa. Liitoksen lopullisen lisäkonduktanssin arvoon vaikuttaa merkittävästi myös käytettyjen lähtötietojen tarkkuudet sekä määrittystapa. Etenkin alapohjatarkasteluiden osalta tässä työssä saatuja tuloksia on tarkasteltava kriittisesti johtuen toistaiseksi vahvistamattomien määräysten ja ohjeiden laskentamenettelyjen eroavaisuuksista ja ristiriidoista. Laskentatapojen erot saattavat vaikuttaa huomaamattomilta, mutta kun on kyse pienistä luvuista, on desimaalieroillakin suuri merkitys lopulliseen tulokseen.

Kaikkia virhelähteitä ei pystytä tämän työn puitteissa selvittämään tai määrittämään. Eli on mahdollista, että pienillä muutoksilla laskentamenettelyssä on merkittävä vaikutus saatuun lisäkonduktanssin lukuarvoon. Joka tapauksessa on syytä kyseenalaistaa tässä työssä käytetyn WUFI 2D – laskentaohjelman soveltuvuus tietyn tyyppisten liitosratkaisujen tarkastelussa.

## 8 Johtopäätökset

Tähän lukuun on koottu johtopäätökset työn aikana tutkituista ja käsitellyistä asiayhteyksistä.

### 8.1 WUFI 2D

WUFI 2D -ohjelmalla yksittäisten liitosten ja vertailurakenteiden mallintaminen on melko helppoa. Ohjelmassa on laaja materiaalikirjasto, mutta kuten tässä työssä laskettujen esimerkkienkin kohdalla myös uusien materiaalien lisääminen onnistuu helposti. Materiaaleilta poistetaan myös ominaisuudet, joita ei lämmönläpäisykertoimen määrittämisessä ole tarpeen huomioida, joten laskenta on ajallisesti melko nopeaa. Ohjelman rajoitteena voidaan mainita etenkin monimuotoisten rakenteiden ja liitosten kohdalla se, että geometrisesti ohjelmalla on mahdollista mallintaa vain suorakulmaisia muotoja, mikä rajaa joitakin mahdollisesti tulokseen vaikuttavia rakenteita pois laskennasta. Lämpövirran tiheyden määrittämislinjan tulee myös olla WUFI:ssa tasainen, joten mallissa ei voi olla pykälää alueella jolta lämpövirta halutaan määrittää. WUFI 2D ei laske valmiiksi yhdestä mallista lämpövirtoja sekä liitokselle että liitoksessa liittyville vertailurakenteille, joten molemmille tulee suorittaa mallintaminen ja laskennat erikseen, mikä lisää työmäärää. WUFI 2D antaa rakenteelle keskimääräisen lämpövir-

rantiheyden (*Heat Flux*), jolloin saatu lämpövirta tulee erikseen kertoa rakenteen pituudella ( $l_j$ ).

Tämän työn lopputuloksena saadut lisäkonduktanssien arvot eivät laskelmien perusteella ole merkittävästi pienempiä annettuihin taulukkoarvoihin verrattuna, joten WUFI:lla tarkemmin määritettyjen lisäkonduktanssien avulla ei välttämättä saavuteta kovinkaan merkittävää hyötyä rakennuksen johtumislämpöhäviöiden pienentämiseksi. Tämä saattaa johtua ohjelman ominaisuuksista kuten esimerkiksi siitä, ettei se sovellu näin tarkkaan laskentaan ja siitä, että ohjelma saattaa joidenkin rakenteiden kohdalla yliarvioida liitosten kylmäsiirtovaikutuksia. Osan tutkittujen liitosten kohdalla WUFI:lla saavutettiin kuitenkin jopa 77 % ero taulukkoarvoihin verrattuna, joten ohjelmaa olisi hyvä tutkia todellisen kohteen avulla, jotta nähtäisiin, kuinka paljon kokonaislämpöhäviön suuruuteen todellisuudessa vaikutetaan, jos saavutettu ero on jopa 77 %.

## 8.2 Ilmaisohjelmien käyttökelpoisuuden arviointi

Ilmaisohjelmien osalta on syytä huomata, että niiden käytettävyyys ja toimivuus saattaa olla rajallista. Käyttökokemuksien perusteella esimerkiksi ilmaisohjelmaksi listattu KOBRA on tarkoitettu vain ohjelmasta valmiina löytyvien rakennemallien laskentaan, eikä rakenteen vapaa mallintaminen ole ilmaisversiolla mahdollista. Lisäksi on merkittävää myös huomata, että kyseinen ohjelma on yli kymmenen vuotta vanha, joten se ei ole kovin nykyaikainen käytettävyydeltään ja ohjelman toimiminen tämän päivän käyttöjärjestelmillä on rajallista.

Unorm on puolestaan rakenteen mallinnusominaisuuksiltaan monipuolisempi. Ohjelmalla on mahdollista mallintaa samanaikaisesti todellinen rakenne sekä vertailurakenne ja ohjelma myös laskee suoraan arvon liitoksen lisäkonduktanssille. Ohjelman käyttöliittymä ja erityisesti rakenteen geometrinen mallinnus on kuitenkin raskas ja työläs käyttää, minkä vuoksi monimuotoisten ja useista materiaalikerroksista muodostuvien rakenteiden mallinnus on haasteellista.

Testatuista ilmaisohjelmista Therm on mallinnuksen suhteen käyttäjäystävällisin ja yksinkertaisin. Therm on kuitenkin alun perin suunniteltu ikkunoiden ja ikkunaliitosten mallintamiseen. Myös muiden rakenneliitosten mallintaminen tulisi olla mahdollista, mutta ohjelmassa ilmeni ongelma raja-arvojen määrittämisessä. Valmiita pintavastusar-

voja käytettäessä laskenta onnistuu, mutta yrittäessä laskentaa ohjeiden mukaisten pintavastusarvojen mukaan ilmenee laskennassa ongelmia, joiden takia laskentaa ei saatu suoritettua loppuun.

### 8.3 Kuka määrittää liitosten lisäkonduktanssit lämpöhäviölaskentoja varten?

Rakennuksen lämpöhäviöiden määräystenmukaisuus osoitetaan energiaselvityksen osana rakennuslupaa haettaessa ja se kuuluu yleissuunnitteluvaiheessa laadittaviin rakennuslupa-asiakirjoihin. Energiaselvitystä päivitetään suunnittelun ja toteutuksen edetessä ja pääsuunnittelijan tulee varmentaa se ennen rakennuksen käyttöönottoa. Rakennuksen energiatodistuksen laatii pääsuunnittelija. RakMK D3 mukaisesti energiaselvityksen yhtenä osana on rakennuksen E-luvun määrittäminen. Varsinaisen E-luvun laskennan suorittajalle ei ole asetettu vaatimuksia, mutta käytettävien laskentatyökalujen ominaisuuksille kyllä. Yleensä energiaselvityksen, -todistuksen ja näitä varten tarvittavat laskelmat laatii pääsääntöisesti talotekniikkasuunnittelija, energiakonsultti tai mahdollisesti elinkaarisuunnittelija. Rakennuksen kokonaislämpöhäviön laskennan suorittaa yleensä talotekniikkasuunnittelija, jolla on tietotaito laskentaan tarvittavista lähtötiedoista.

Uudishankkeen alkuvaiheessa E-luvulle asetetaan tavoitearvo ja suunnittelijoiden yhteistyöllä pyritään löytämään perusratkaisut, joilla tavoite saavutetaan. Tämän tarkoittaa sitä, että tekniset perusratkaisut on päätettävä selkeästi aikaisemmin hankkeissa verrattuna aikaisempaan eli ennen 2012 voimaan astuneisiin määräyksiin. [1. s. 28; 8]

Energiatarkasteluista vastuussa oleva henkilö kokoaa muilta suunnittelijoilta energialaskentaa varten tarvittavat tiedot. Etenkin alkuvaiheessa joudutaan kuitenkin käyttämään arvioita, sillä esimerkiksi rakenteiden todellisten U-arvojen määrittäminen ei yleensä ole mahdollista. [8.]

Rakennesuunnittelijan keskeisenä tehtävä on suunnitella rakennuksen vaipparakenteet lämpö- ja kosteusteknisesti toimiviksi. Tällä tarkoitetaan muun muassa vaipparakenteiden lämmöneristävyyttä, ilma- ja höyrytiiveyttä, tuulensuojausta ja kylmäsiltojen välttämistä sekä kylmäsilta-vaikutuksen minimoimista. Rakennesuunnitelmissa esitetään selvästi rakenteiden yksityiskohdat ja keskeiset vaatimukset niiden toteuttamiselle [2, s.

55-56]. Toteutusvaiheessa on varmistuttava, että rakenteet toteutetaan huolellisesti suunnitelmien mukaisesti. [1, s. 58]

Rakennuksen vaipparakenteiden U-arvot merkitään yleensä rakennuslupahakemukseen kuuluviin rakennetyyppien ominaisuuksiin. Toteutettavien rakennetyyppien ja rakenteiden U-arvojen määrittäminen kuuluu pääsääntöisesti rakennesuunnittelijan tehtäviin. Koska rakennesuunnittelija suunnittelee rakennusosaliitokset yksityiskohtaisesti rakennepiirustuksiin ja rakennesuunnittelijalla on tietotaito rakenteiden sekä rakennusosien liitosten rakennusfysikaalisesta toimivuudesta on oletettavissa, että lisäkonduktanssien tarkempi laskennallinen määrittäminen tulee kuulumaan rakennesuunnittelijan tehtäviin.

#### 8.4 Viivamaisten lisäkonduktanssien määrittäminen vai taulukkoarvot

Tämän työn kaltaiset liitosten kylmäsiirtotarkastelut vaikuttavat olevan Suomessa vielä melko tuntematon asia ja useista eurooppalaisista lähteistä kävi ilmi, että monissa muissa maissa tällä saralla ollaan jo huomattavasti Suomea edellä. Määräykset uudisrakentamisen osalta astuivat jo heinäkuussa 2012 voimaan, mutta vaikuttaa siltä, että muutosten tuomat velvoittavat uudistukset ovat monille alalla työskenteleville vielä epäselviä. Monet aiheesta käsittelevät ohjeet ovat toistaiseksi vahvistamattomia ja niiden soveltuvuutta todellisiin tarkasteluihin ei välttämättä ole vielä riittävässä määrin tutkittu.

Se, missä määrin lisäkonduktanssien osuus tullaan huomioimaan käyttäen valmiita taulukkoarvoja tai tarkemmin laskennallisesti selventyneen vasta ajan kuluessa. Helpoin ja sitä kautta nopein tapa on varmasti käyttää valmiiksi laskettuja taulukkoarvoja tai mahdollisuuksien mukaan valmistajien ilmoittamia arvoja. Tarkempaan laskennalliseen määrittämiseen kuluu aikaa ja resursseja. Oletettavissa on myös, että rakennusosaliitosten lisäkonduktanssien arvon tarkempi määrittäminen ja sitä kautta saavutettava pienempi lämpöhäviövaikutus on viimeisimpiä ratkaisuja pienemmän kokonaislämpöhäviön tavoittelemiseen. Sitä luultavasti tullaan hyödyntämään vasta sitten kun muita keinoja ei ole.

## 8.5 Työn arviointi

Tämän työn aihe oli mielestäni varsin mielenkiintoinen ja ajankohtainen tutkia. Rakennusten ja rakenteiden rakennusfysikaalinen toiminta on tänä päivänä esillä monissa eri asiayhteyksissä ja sen merkitys rakenteiden suunnittelussa kasvaa etenkin energiamääräysten kiristytessä. Muuttuneet määräykset vaikuttivat olevan vielä tämän työn aikana hieman uutuuden myllerryksessä ja laskentaosuudessa kohdattiin haasteita, joiden seurauksena laskentaosuus aiheutti odotettua enemmän työtä. Annettuja ohjeita piti soveltaa melko paljon, sillä jokainen ohjelma toimii eri tavalla ja rakenneliitokset ovat laskentatavoiltaan erilaisia, joten niiden laskentaa ei voi monistaa liitosten välillä. Työ osoitti mielestäni selkeästi kuitenkin sen, kuinka tärkeää on tutkia laskentaohjelmista saatavia tuloksia sekä laskennan teoreettisia taustoja kriittisesti eikä vain turvautua suoraan ohjelmista saatuihin tuloksiin. Laskentamallien osalta merkittäväksi seikaksi osoittautui, että on tärkeä olla huolellinen rakenteiden sekä materiaalien mallinnuksessa, sillä pienilläkin dimensioiden, materiaali- ja laskentaominaisuuksien muuttamisella voi olla lopulliseen tulokseen merkittävä vaikutus.

Uusien määräysten asettamisen yhtenä pyrkimyksenä kerrotaan olevan suunnittelijoiden yhteistyön lisääminen. Lisäksi uusien määräysten tavoitteena on vähentää rakennusten energiankulutusta ja hiilidioksidipäästöjä. Tämä on tavoittelemisen arvoista, mutta tänä päivänä usein raha, aikataulut ja resursointi ohjaavat väkisin ajattelutavan siihen, että hankkeissa asetettujen aikataulu- ja kustannusvaatimusten täyttäminen menee ensisijaiseksi tavoitteeksi. Tämä on asia, joka koskettaa erityisemmin rakennushankkeen eri osapuolia ja menee usein pidempiaikaisten vaikutusten edelle jo senkin takia, että vaikutus on konkreettisempi ja näkyvämpi. Määräyksiä annettaessa sanotaan mm., että muuttuneet ohjeet mahdollistavat uusien innovatiivisempien ratkaisujen käytettävyyden ja hyödyntämisen. On kuitenkin huomattava, että Suomessa asemakaavat määräävät pääasiassa rakennusten muodon, sijainnin ja käyttötarkoituksen. Asemakaavojen lähtökohtainen tavoite ainakaan toistaiseksi ei ole ollut edistää energiatehokkuutta. Tästä johtuen uusiutuvien luonnonvarojen mahdollisimman tehokas hyödyntäminen ei ole tällä hetkellä valitettavasti mahdollista, vaikka määräysten on tarkoitus siihen kannustaa. Tämän takia esimerkiksi rakennuksen sijoittaminen optimaalisesti suhteessa aurinkoon ei useissa tapauksissa ole mahdollista.

Lähtökohtaisesti ei aina myöskään ole järkevää pohjautua aina reilusti varmallalla puolella oleviin taulukkoarvoihin. Lisäkonduktanssien tarkemmasta määrittämisestä saavutetta-



via hyötyjä varsinaista E-lukua ja rakennuksen kokonaislämpöhäviötä ajatellen tulisi tutkia tarkemmin todellisissa kohteissa, jotta siihen kohdistettavat työpanokset ja materiaalikulut voitaisiin suhteuttaa saavutettaviin hyötyihin. Taulukkoarvot ovat varmalla puolella, joten suunnittelija pyrkii liitosten minimointiin, jotta liitosten aiheuttamat lämpöhäviöt pysyisivät mahdollisimman vähäisenä. Tämä on tietysti se mihin suunnittelijan täytyy pyrkiä ja on tavoittelemisen arvoinen asia, mutta erikoisissa kohteissa ja geometrisesti monimuotoisissa rakennuksissa liitosten määrä saattaa kasvaa merkittävästi, jolloin laskenta voi olla välttämätöntä, jottei liitosten aiheuttama lämpöhäviöiden osuus kasva huomattavasti, jos vertailuna käytetään varmalla puolella olevien taulukkoarvojen avulla laskettua kokonaisjohtumislämpöhäviötä.

Kun tulevaisuudessa rakenneosien välisten viivamaisten kylmäsiltojen tarkasteluja aletaan määrittää tarkemmin laskennallisesti, niin olisi hyödyllistä tutkia tarkemmin muiden ohjelmien käyttökelpoisuutta viivamaisten kylmäsiltojen lisäkonduktanssien määrittämiseen. Käyttäjäystävällisin olisi oletettavasti ohjelma, joka laskee samanaikaisesti lämpövirrat liitos- sekä vertailurakenteelle ja joka laskisi myös lisäkonduktanssin suoraan. Lisäksi olisi hyödyllistä tutkia tarkemmin WUFI:n sekä muiden ohjelmien laskentaa erityisesti alapohjarakenteiden osalta. Myös jatkossa tulee huomioida, että käsinlaskennan ja tietokonesimuloinnin yhdistäminen voi lisätä virheiden määrää laskelmissa sekä vähentää tulosten tarkkuutta.

## 9 Yhteenveto

Kesällä 2012 voimaan astuneet energiamääräykset toivat mukanaan uudistuksia rakennusten lämpöhäviöiden laskentaan. Rakennusosakohtaisesta tarkastelusta siirryttiin syvemmälle rakennuksen kokonaisvaltaisempaan tarkasteluun. Muuttuneiden määräyksien myötä rakennuksen johtumislämpöhäviöiden laskennassa huomioidaan rakennusosien liitosten väliset lämpöhäviöt viivamaisten lisäkonduktanssien avulla. Rakenteiden määräysten mukaisuus osoitetaan edelleen tasauslaskennalla rakennusosakohtaisilla U-arvoilla, joissa huomioidaan rungon säännölliset kylmäsilat. Määräysten mukaan johtumislämpöhäviöiden laskennassa liitoksille voidaan käyttää valmiiksi annettuja taulukkoarvoja, mutta ne voidaan myös määrittää tarkemmin laskennallisesti. Valmiit taulukkoarvot ovat varmalla puolella ja liitoksen aiheuttamaa lämpöhäviötä voidaan pyrkiä pienentämään määrittämällä ne tarkemmin liitoskohtaisesti, simuloimalla rakennusohjeiden mukaisesti siihen soveltuvalla ohjelmalla.

Tämän työn teoriaosuudessa tutkittiin kirjallisuuslähteiden avulla kylmäsiltojen vaikutusta rakennuksen vaipan lämpöhäviöihin sekä käsiteltiin, millä tavoin liitosten väliset kylmäsiltoja huomioidaan rakennuksen johtumislämpöhäviöiden ja kokonaislämpöhäviöiden laskennassa. Tämän pohjalta määritettiin, kuinka rakennusosien välisten kylmäsiltojen lisäkonduktanssien tarkempi määrittäminen tapahtuu simuloinnin avulla.

Työn laskennallisessa osuudessa tutkittiin viittä rakenneliitosta, jotka ovat tyypillisiä liitoksia uusissa toimitila- ja teollisuuskohteissa ja joille ei ole toistaiseksi annettu valmiita taulukkoarvoja. Laskennallisessa osuudessa tutkittujen liitosten avulla analysoitiin myös WUFI 2D -ohjelman soveltuvuutta tällaisiin tarkasteluihin. Lisäksi työssä testattiin kolmea eri ilmaisohjelmaksi luokiteltua ohjelmaa ja niiden soveltuvuutta rakennusosien välisten viivamaisten lisäkonduktanssien määrittämiseen. Saatujen tulosten pohjalta arvioitiin, kuinka paljon johtumislämpöhäviötä ajatellen saavutetaan hyötyä, jos liitokset mallinnetaan tapauskohtaisesti.

Viidestä tehdystä laskennasta voidaan todeta kolmen onnistuneen luotettavasti. Kahden liitoksen osalta tulokset olivat epäloogisia ja näiden rakenteiden laskentatarkastelut vaatisivat vielä tarkempaa syventymistä. Tuloksena saadut rakennusosien väliset viivamaiset lisäkonduktanssit olivat pääsääntöisesti pienempiä kuin vertailuarvoina käytetyt taulukkoarvot. Lisäkonduktanssien tarkempi määrittäminen WUFI-ohjelmalla onnistuu, mutta on kuitenkin huomattava, että mallinnus on aikaa vievää ja joidenkin laskentojen osalta hyvinkin työlästä. Laskennassa on välttämätöntä yhdistää käsinlaskentaa ja tietokonelaskentaa, jotta haluttu lopputulos saadaan. Liitosten välisten lisäkonduktanssien määrittämisessä tulee ymmärtää laskennan periaatteet, jotta saatuun tulokseen voi luottaa. Koska lisäkonduktanssien laskennassa käsitellään pääasiassa tietokonesimuloinnilla saatuja desimaalilukuja, pienilläkin laskennan parametrien muutoksilla voi olla suuri vaikutus lopputulokseen.

## Lähteet

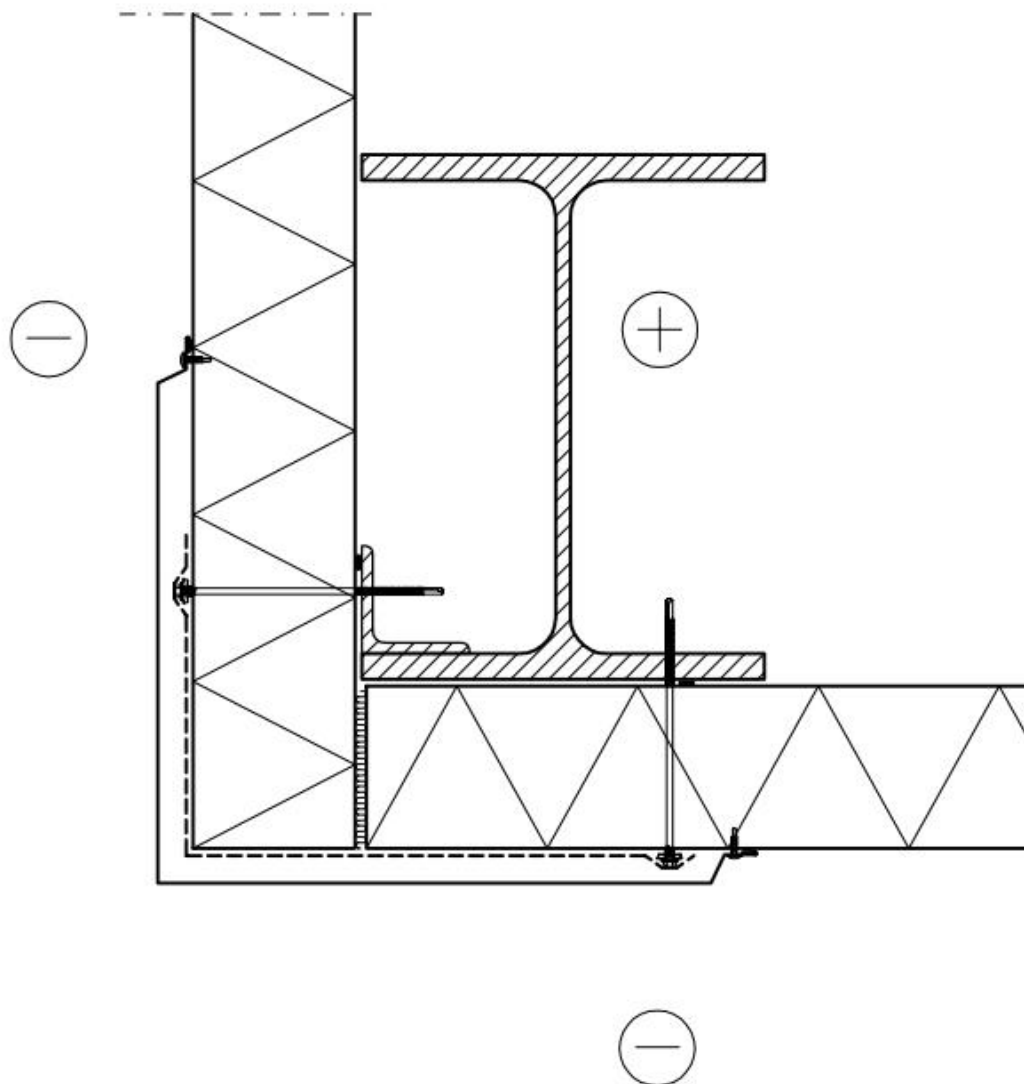
- 1 RIL 259-2012. 2012. Matalaenergiarakentaminen toimitilat. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Saarijärven Offset Oy.
- 2 RIL 249-2009. 2010 Matalaenergiarakentaminen asuinrakennukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Saarijärven Offset Oy 2010, 3. Korjattu painos.
- 3 RIL 155. 1984. Lämmön- ja kosteudeneristys. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Jyväskylä: Gummerus Oy.
- 4 Lämmöneristysohjeet. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C4 Luonnos 16.03.1012. Helsinki: Ympäristöministeriö
- 5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5 Luonnos 14.03.1012. Helsinki: Ympäristöministeriö
- 6 Rakennuksen energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. Helsinki: Ympäristöministeriö
- 7 Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelman ohje rakennusosien viivamaisten kylmäsiltojen laskentaan. Helsinki: Ympäristöministeriö
- 8 Kurnitski, Jarek. 2012. Energiamääräykset 2012. Sastamala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- 9 Piironen, Jarkko. 2012. Askel kohti energiatehokkaampaa rakennuskantaa. Projektitiutiset 3/2012 sivu 8. Saatavissa:  
<<http://www.projektiutiset.fi/ePaper/PU312/files/assets/basic-html/page8.html>>  
Luettu 1.8.1012.
- 10 Hens, Hugo. 2011. Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- 11 Björkholtz, Dick. 1987. Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- 12 Suvanto, Kari. 2005. Tekniikan fysiikka 1. Helsinki: Edita Prima Oy.
- 13 Lehto, H., Luoma, T. 1995. Fysiikka 3. Lämpö ja energia mekaniikka. Jyväskylä: Gummerrus Kirjapaino Oy, 5. -9. Uudistettu painos.

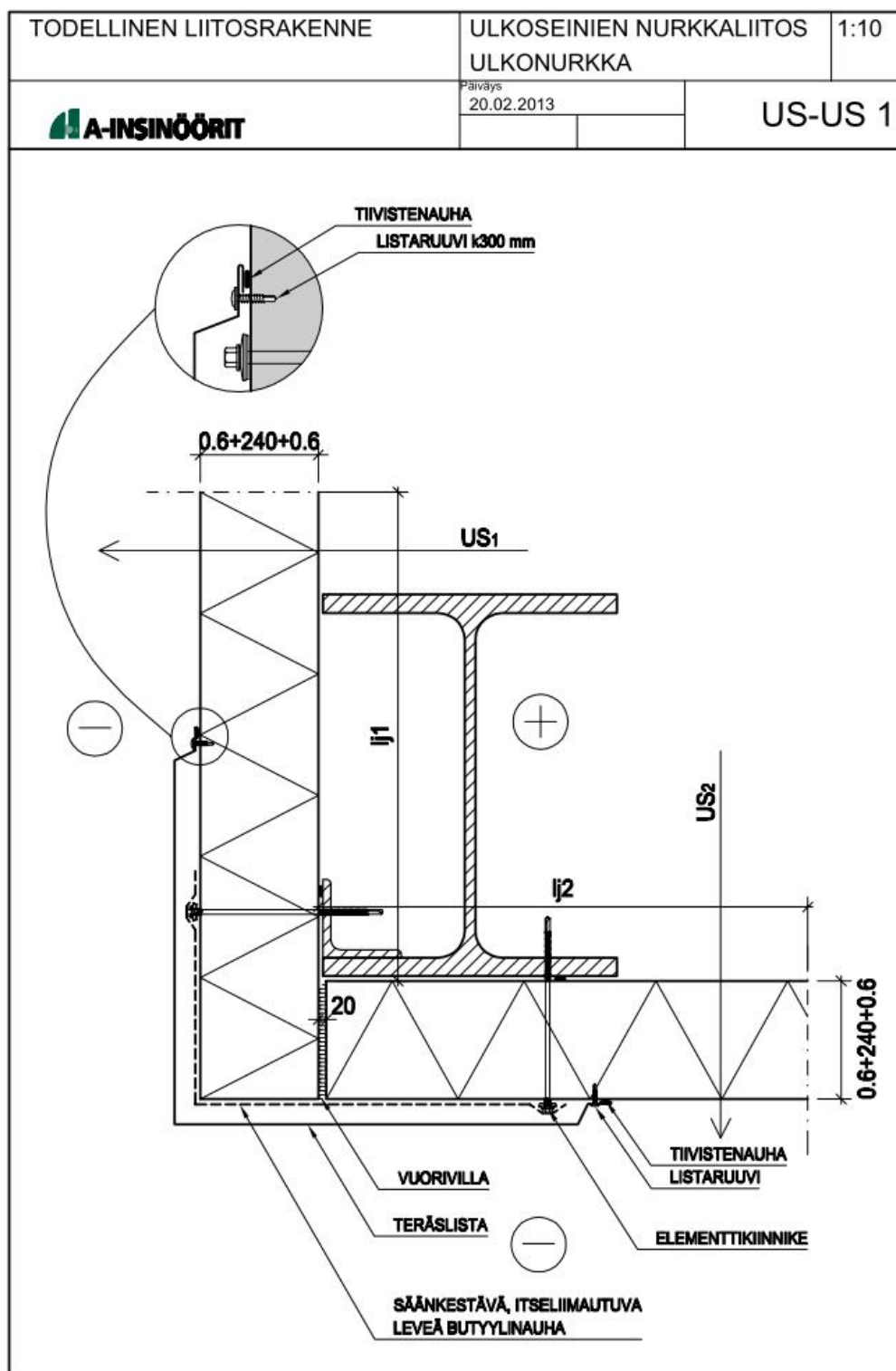
- 14 E-luku on tärkeässä osassa rakennusten energiankulutuksen hillitsemisessä. 2013. Verkkodokumentti Lamit Oy. <<http://www.lamit.fi/fi/e-luku>> Päivitetty 16.01.2013. Luettu 01.02.2013.
- 15 E-luku. 2013. Verkkodokumentti. Suomen asuntomessut. <<http://www.asuntomessut.fi/tampere-2012/e-luku>> Luettu 01.10.2012.
- 16 Erhorn, H. Erhorn-Kluttig, H. An effective Handling of Thermal Bridges in the EPBD Context. 2010. Verkkodokumentti ASIEPI.< <http://www.asiepi.eu/wp-4-thermal-bridges/reports.html> > Luettu 01.09.2012.
- 17 Energy loss due to Thermal Bridge 2012. Verkkodokumentti. Mass Energy Lab Inc. <<http://www.massenergylab.com/blog/?p=1612> > Luettu 24.03.2013.
- 18 Kylmäsillat. Verkkodokumentti Schöck Bauteile GmbH. <<http://www.schoeck.fi/fi/schoeckistae>> Luettu 03.12.2012.
- 19 Lämpöhäviöt kuriin. Verkkodokumentti korjaustieto. <<http://www.korjaustieto.fi/pientalot/pientalojen-energiatohokuus/lampohaviot-kuriin.html>> Luettu 03.12.2012.
- 20 Heikkinen, Jorma. 2011. Betonielementtirakenteiden rakennuksen vaipan kylmäsillatarkastelut. Verkkodokumentti VTT. <[http://asv.fi/files/documents/pdf/vtt\\_tutkimusraportti\\_kylmasillat\\_ja\\_eristys.pdf](http://asv.fi/files/documents/pdf/vtt_tutkimusraportti_kylmasillat_ja_eristys.pdf)> Luettu 01.09.2012.
- 21 RAFNET-oppimateriaali. Wufi 3.3 Pro käyttöohje ja esimerkkilaskennat. <<http://www.oamk.fi/~anttor/kurssit/Rakennusfysiikan%20sovellukset/Wufin-ohjeet.pdf>> Luettu 20.09.2012
- 22 Leivo, Virpi. 2011. Maanvastaiset rakenteet ja ryömintätilaiset rakenteet. <<http://www.rakennusteollisuus.fi/download.aspx?intFileID=2299&intLinkedFromObjectID=14884>> Luettu 31.01.2013

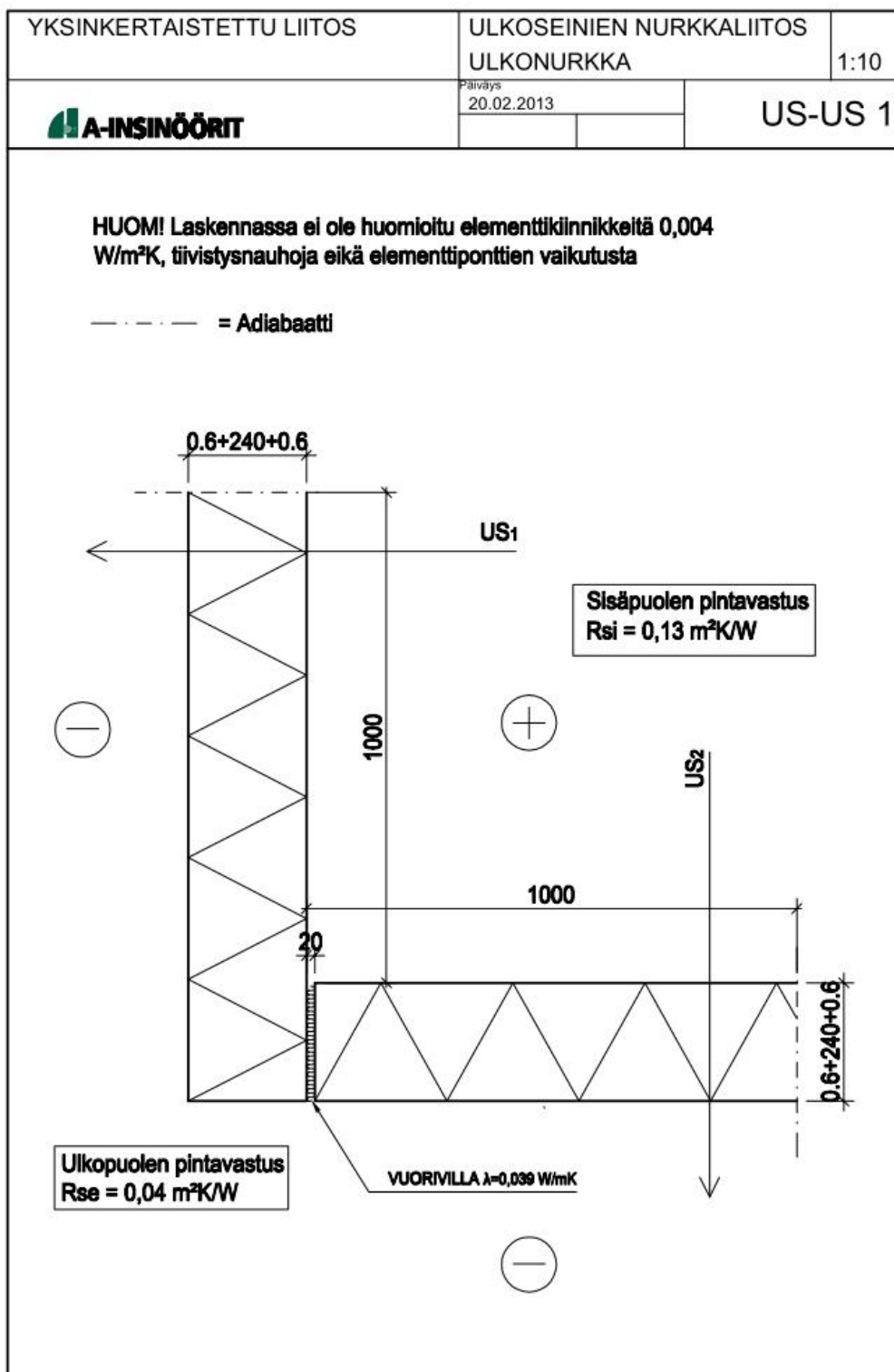
## US-US 1 Ulkoseinien nurkkaliitos ulkonurkka

Tässä liitteessä on esitetty liitoksen US-US 1 lisäkonduktanssin laskenta.

Vertailurakenteiden lämmönläpäisykertoimien laskenta perustuu RakMk C4 luonnokseen 16.3.2012 ja liitoksen lisäkonduktanssin laskennassa on sovellettu viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan esimerkin 6.1.3 laskentaperiaatteita.







### 1.1 Rakenteiden lämmönvastukset ja U-arvot

Liitoksen seinärakenteet ovat identtiset. Ulkoseinärakenteen rakennetyyppi US ks. liite 6.

Taulukossa L1.1 on esitetty ulkoseinän U-arvo laskettuna RakMK C4 luonnos 2012 mukaisesti WUFI 2D:n avulla.

Taulukko L1.1

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{us}$ [m <sup>2</sup> K/W]
US (Ulkoseinäelementti)	0,2412		6,2657
Huom! Rakenteessa ei ole huomioitu elementtien kiinnikkeitä eikä elementtiponttien vaikutusta	$\sum R_{us}$		6,2657
	$U_{us}=1/\sum R$		0,1596 W/m <sup>2</sup> K

### 1.2 Liitoksen lisäkonduktanssi

Rakenneliitos on mallinnettu WUFI 2D ohjelmalla siten, että rakenteiden materiaaliarvoina on käytetty samoja arvoja kun vertailurakenteen U-arvojen laskennassa (taulukko L1.1).

Taulukossa L1.2 on esitetty numeerisesti WUFI:lla määritetty ulkoseinien keskimääräiset lämpövirrat ja lämpövirrat kerrottuna rakenteen mitalla  $l_j$  josta saadaan laskettua liitoksen kytkentäkerroin  $L_{2D}$



Taulukko L1.2

Rakenne	Rakenteen mitta $l_j$ [m]	Keskimääräinen lämpövirta $\Phi$ [W/m <sup>2</sup> K]	Lämpövirta · $l_j$ $\Phi \cdot l_j$ [W/mK]
US <sub>1</sub>	1,0	0,1682	0,1682
US <sub>2</sub>	1,0	0,2089	0,2089
Liitoksen lämpötekkinen kytkentäkerroin = L <sub>2D</sub>			0,3772

Liitoksen lämpötekkinen kytkentä kerroin lasketaan kaavalla

$$L_{2D} = \frac{\sum \Phi l_j}{\theta_i - \theta_e} = \frac{(0,1682 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,0m + 0,2089 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,0m)}{1K - 0K} = 0,3772 \text{ W/mK}$$

jossa,

$\theta_i$  sisälämpötila, K

$\theta_e$  ulkolämpötila, K

Liitoksen kytkentäkertoimesta vähennetään seinien U-arvoilla lasketut lämpövirrat

$$\psi = L_{2D} - U_{US1} \cdot l_{j1} - U_{US2} \cdot l_{j2} = 0,3772 \frac{W}{mK} - 0,1596 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,0m - 0,1596 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,0m = 0,3772 \frac{W}{mK} - 0,3192 \frac{W}{mK} = 0,058 \frac{W}{mK}$$

Jossa,

$U_{US1}$  Ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$U_{US2}$  Ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$l_1$  US<sub>1</sub> rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

$l_2$  US<sub>2</sub> rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

Taulukossa L1.3 on esitetty vertailuna laskettu lisäkonduktanssin arvo sekä taulukon vertailuarvo

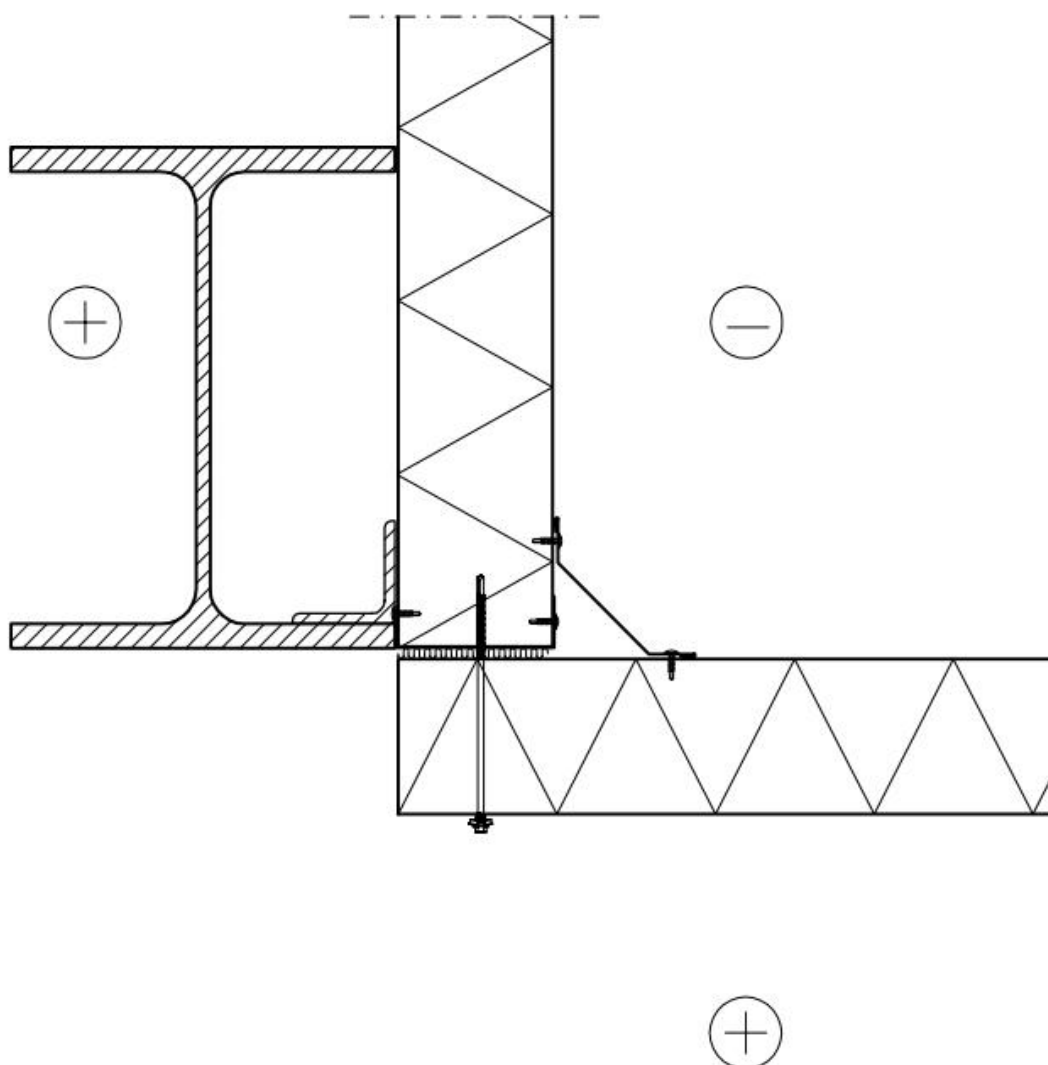
Taulukko L1.3

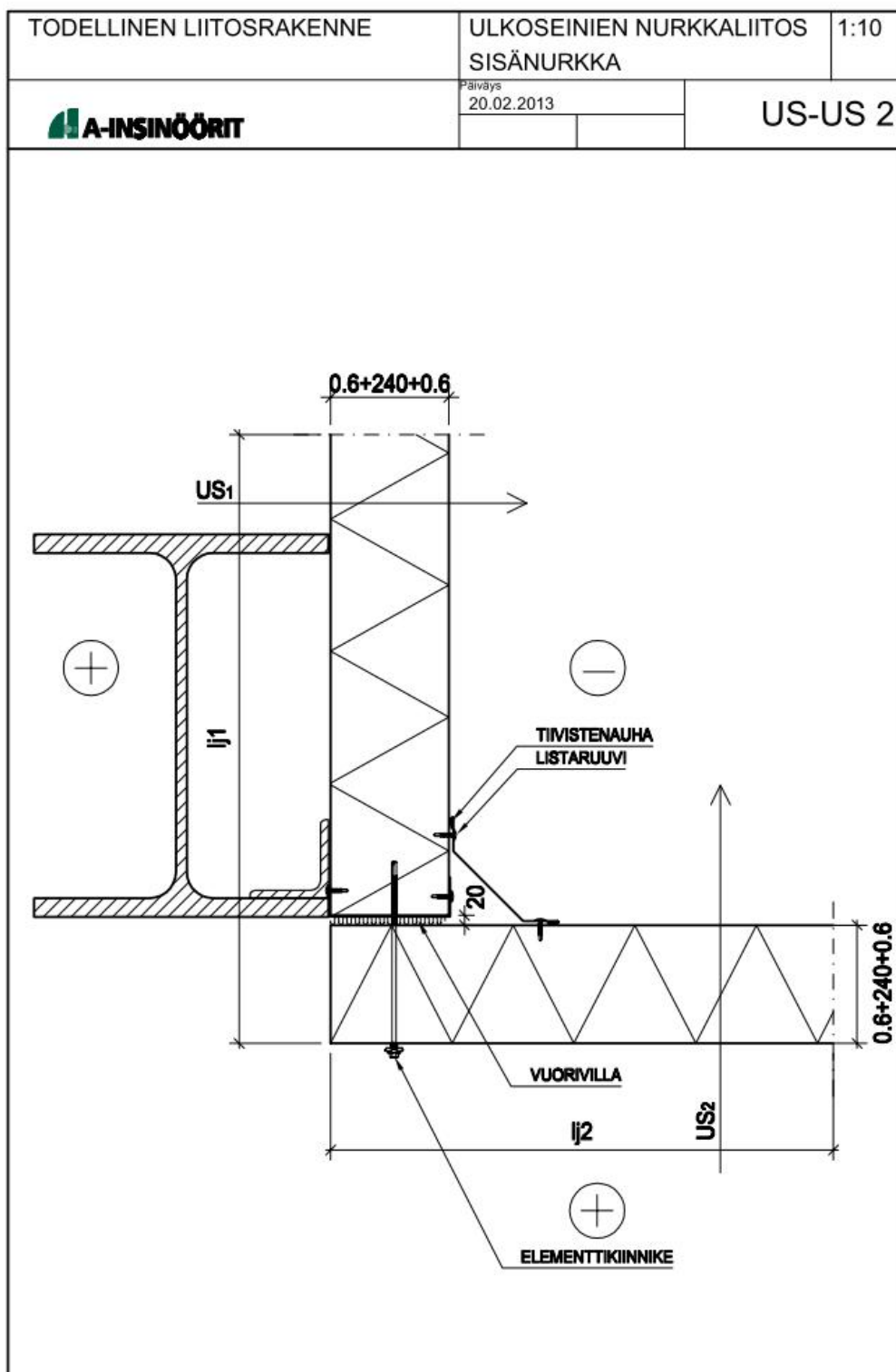
<b>Liitos</b>	<b>Laskettu lisäkonduktanssi [W/mK]</b>	<b>RakMk D5 taulukkoarvo [W/mK]</b>
US-US 1	0,058	0,1

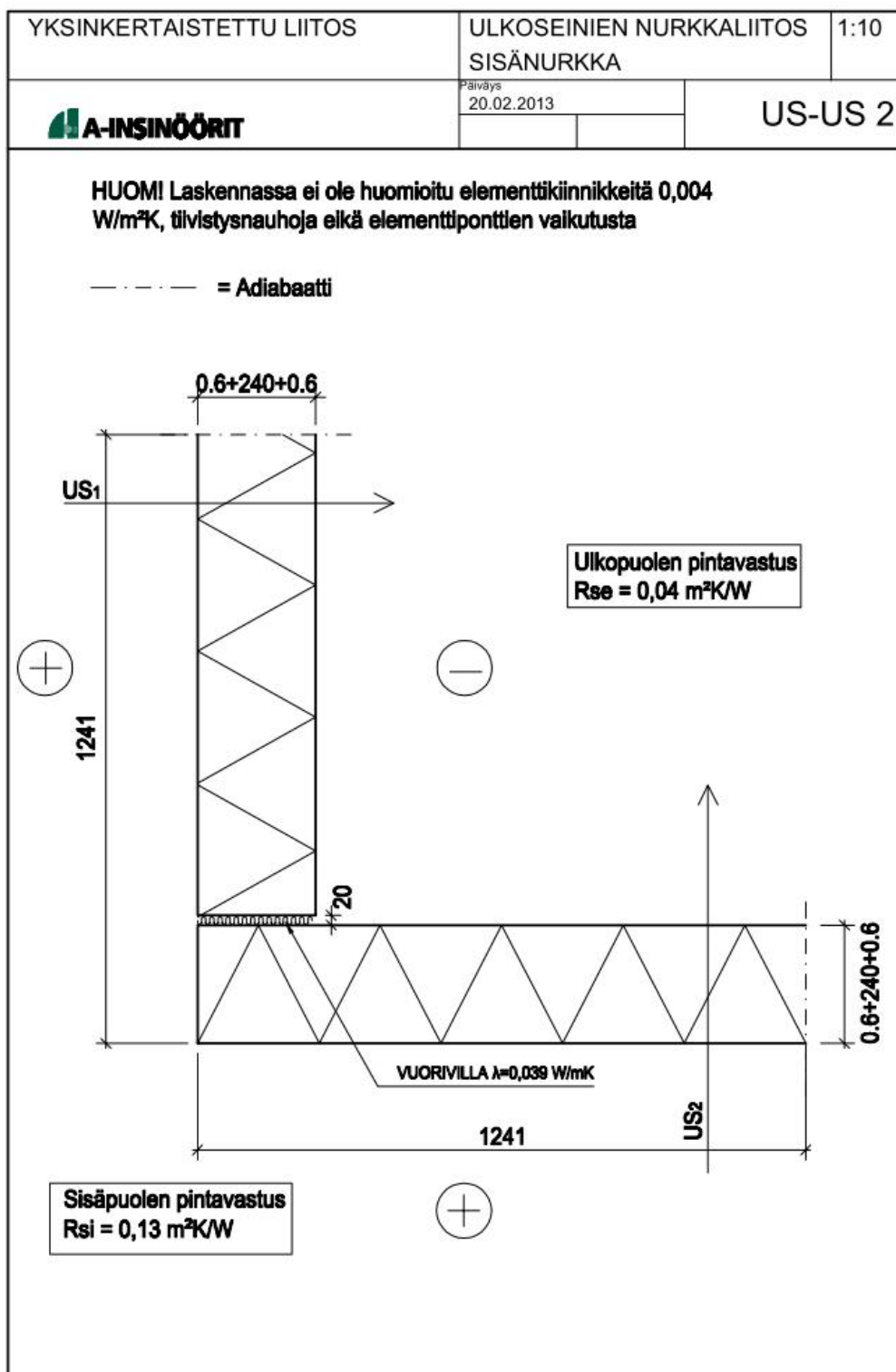
**US-US 2 Ulkoseinien nurkkaliitos sisänurkka**

Tässä liitteessä on esitetty liitoksen US-US 2 lisäkonduktanssin laskenta.

Vertailurakenteiden lämmönläpäisykertoimien laskenta perustuu RakMk C4 luonnokseen 16.3.2012 ja liitoksen lisäkonduktanssin laskennassa on sovellettu viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan esimerkin 6.1.3 laskentaperiaatteita.







### 1.1 Rakenteiden lämmönvastukset ja U-arvot

Liitoksen seinärakenteet ovat identtiset. Ulkoseinärakenteen rakennetyyppi US ks. Liite 6.

Taulukossa L2.1 on esitetty ulkoseinän U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti, Wufi 2D avulla

Taulukko L2.1.

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{us}$ [m <sup>2</sup> K/W]
US (Ulkoseinäelementti)	0,2412		6,2657
Huom! Rakenteessa ei ole huomioitu elementtien kiinnikkeitä eikä elementtiponttien vaikutusta	$\sum R_{us}$		6,2657
	$U_{us}=1/\sum R$		0,1596 W/m <sup>2</sup> K

### 1.2 Liitoksen lisäkonduktanssi

Rakenneliitos on mallinnettu WUFI 2D ohjelmalla siten, että rakenteiden materiaaliarvoina on käytetty samoja arvoja kun vertailurakenteen U-arvojen laskennassa (taulukko L2.1).

Taulukossa L2.2 on esitetty numeerisesti WUFI:lla määritetty ulkoseinien keskimääräiset lämpövirrat ja lämpövirrat kerrottuna rakenteen mitalla  $l_j$ , josta saadaan laskettua liitoksen kytkentäkerroin  $L_{2D}$

Taulukko L2.2.

Rakenne	Rakenteen mitta $l_j$ [m]	Keskimääräinen lämpövirta $\Phi$ [W/m <sup>2</sup> K]	Lämpövirta · $l_j$ $\Phi \cdot l_j$ [W/mK]
US <sub>1</sub>	1,2412	0,1869	0,2319
US <sub>2</sub>	1,2412	0,1386	0,1720
Liitoksen lämpötekkinen kytkentäkerroin = L <sub>2D</sub>			0,4039

Liitoksen lämpötekkinen kytkentä kerroin lasketaan kaavalla

$$L_{2D} = \frac{\sum \Phi l_j}{\theta_i - \theta_e} = \frac{(0,1869 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,2412m + 0,1386 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,2412m)}{1K - 0K} = 0,4040 \text{ W/mK}$$

jossa,

$\theta_i$  sisälämpötila, K

$\theta_e$  ulkolämpötila, K

Liitoksen kytkentäkertoimesta vähennetään seinien U-arvoilla lasketut lämpövirrat

$$\psi = L_{2D} - U_{US1} \cdot l_{j1} - U_{US2} \cdot l_{j2} = 0,4040 \frac{W}{mK} - 0,1596 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,2412m - 0,1596 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,2412m = 0,4040 \frac{W}{mK} - 0,3962 \frac{W}{mK} = 0,0077 \frac{W}{mK}$$

Jossa,

$U_{US1}$  Ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$U_{US2}$  Ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$l_1$  US<sub>1</sub> rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

$l_2$  US<sub>2</sub> rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

Taulukossa L2.3 on esitetty vertailuna laskettu lisäkonduktanssin arvo sekä taulukon vertailuarvo

Taulukko L2.3.

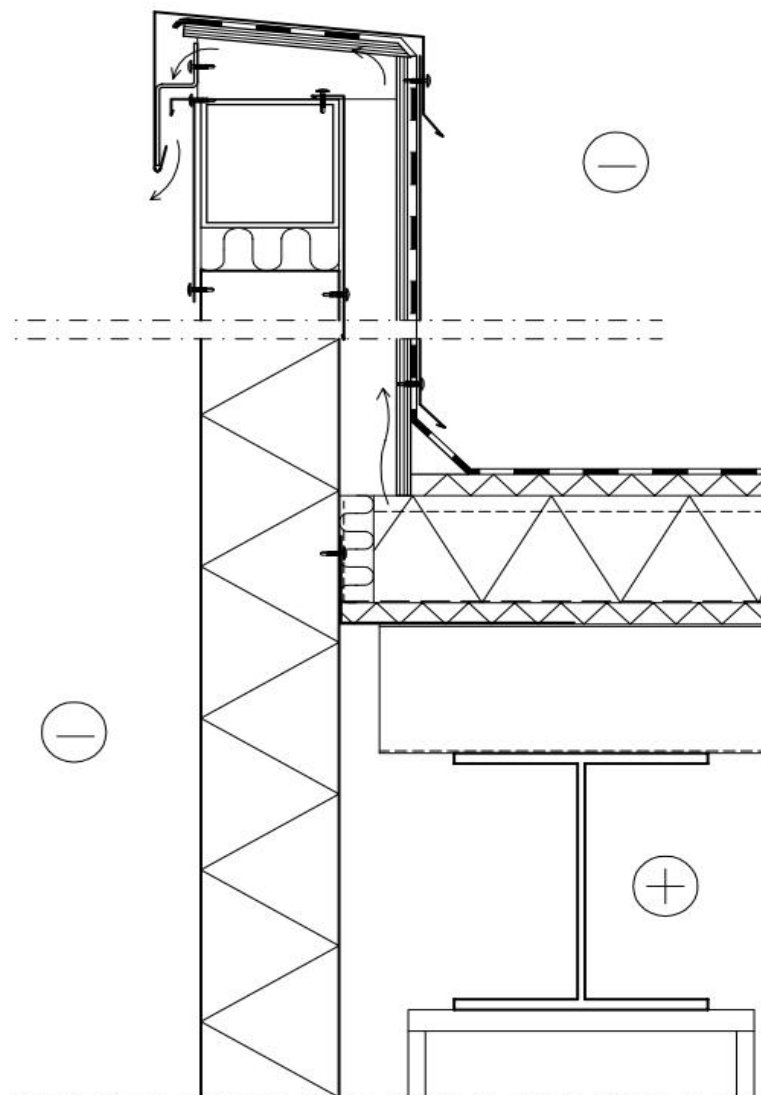
<b>Liitos</b>	<b>Laskettu lisäkonduktanssi [W/mK]</b>	<b>RakMk D5 taulukkoarvo [W/mK]</b>
US-US 2	0,0077	- 0,1

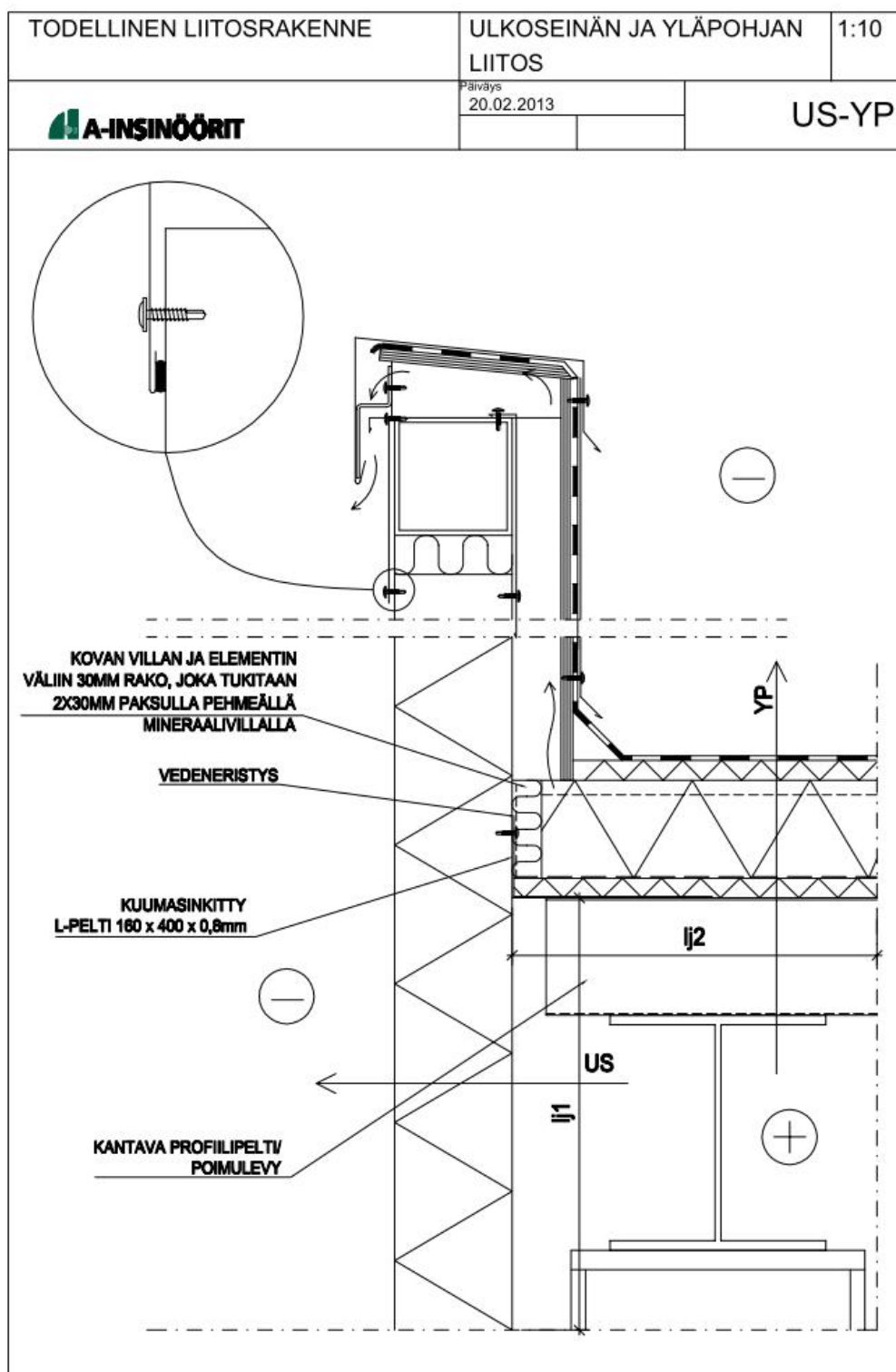


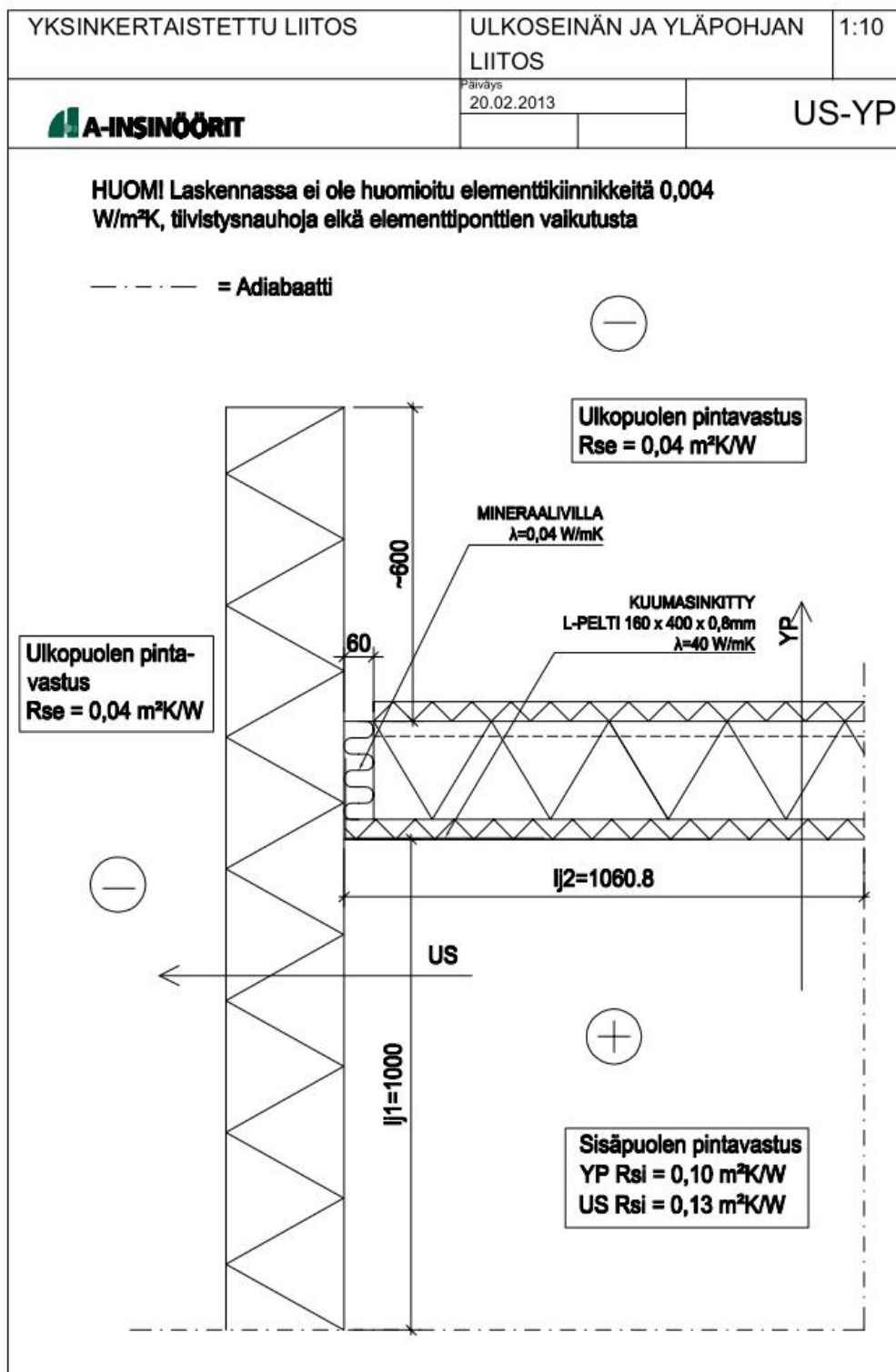
## US-YP Ulkoseinän ja yläpohjan liitos

Tässä liitteessä on esitetty liitoksen US-YP lisäkonduktanssin laskenta.

Vertailurakenteiden lämmönläpäisykertoimien laskenta perustuu RakMk C4 luonnokseen 16.3.2012 ja liitoksen lisäkonduktanssin laskennassa on sovellettu viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan esimerkin 6.1.4 laskentaperiaatteita.







## 1.1 Rakenteiden lämmönvastukset ja U-arvot

Ulkoseinärakenteen rakennetyyppi US ks. liite 6.

Taulukossa L3.1 on esitetty ulkoseinän U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti, Wufi 2D:n avulla.

Taulukko L3.1.

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{US}$ [m <sup>2</sup> K/W]
US (Ulkoseinäelementti)	0,2412		6,2657
Huom! Rakenteessa ei ole huomioitu elementtien kiinnikkeitä eikä elementtiponttien vaikutusta		$\sum R_{US}$	6,2657
		$U_{US}=1/\sum R$	0,1596 W/m <sup>2</sup> K

Yläpohjarakenteen rakennetyyppi YP ks. liite 7.

Taulukossa L3.2 on esitetty yläpohjan U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti, Wufi 2D:n avulla

Taulukko L3.2.

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{YP}$ [m <sup>2</sup> K/W]
YP	0,2412		
		$\sum R_{YP}$	7,9428
		$U_{YP}=1/\sum R$	0,1259 W/m <sup>2</sup> K

## 1.2 Liitoksen lisäkonduktanssi

Rakenneliitos on mallinnettu WUFI 2D ohjelmalla siten, että rakenteiden materiaaliarvoina on käytetty samoja arvoja kun vertailurakenteen U-arvojen laskennassa (taulukot L3.1 ja L3.2).

Taulukossa L3.3 on esitetty numeerisesti WUFI:lla määritetty ulkoseinän ja yläpohjan keskimääräiset lämpövirrat ja lämpövirrat kerrottuna rakenteen mitalla  $l_j$  josta saadaan laskettua liitoksen kytkentäkerroin  $L_{2D}$

Taulukko L3.3.

Rakenne	Rakenteen mitta $l_j$ [m]	Keskimääräinen lämpövirta $\Phi$ [W/m <sup>2</sup> K]	Lämpövirta $\cdot l_j$ $\Phi \cdot l_j$ [W/mK]
US	$l_{j1}=1,0$	0,2004	0,2004
YP	$l_{j2}=1,0608$	0,2068	0,2194
Liitoksen lämpötekninen kytkentäkerroin = $L_{2D}$			0,4198

Liitoksen lämpötekninen kytkentä kerroin lasketaan kaavalla

$$L_{2D} = \frac{\sum \Phi l_j}{\theta_i - \theta_e} = \frac{(0,2004 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1,0 \text{ m} + 0,2068 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1,0608 \text{ m})}{1 \text{ K} - 0 \text{ K}} = 0,4198 \text{ W/mK}$$

jossa,

$\theta_i$  sisälämpötila, K

$\theta_e$  ulkolämpötila, K

Liitoksen kytkentäkertoimesta vähennetään seinän ja yläpohjan U-arvoilla lasketut lämpövirrat

$$\psi = L_{2D} - U_{US} \cdot l_{j1} - U_{YP} \cdot l_{j2} = 0,4198 \frac{\text{W}}{\text{mK}} - 0,1596 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 1,0 \text{ m} - 0,1259 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 1,0608 \text{ m} = 0,4198 \frac{\text{W}}{\text{mK}} - 0,22934 \frac{\text{W}}{\text{mK}} = 0,1266 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Jossa,

$U_{US}$	Ulkoseinärakenteen U-arvo, $W/m^2K$
$U_{YP}$	Yläpohjarakenteen U-arvo, $W/m^2K$
$l_1$	Ulkoseinärakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m
$l_2$	Yläpohjarakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

Taulukossa L3.4 on esitetty vertailuna laskettu lisäkonduktanssin arvo sekä taulukon vertailuarvo

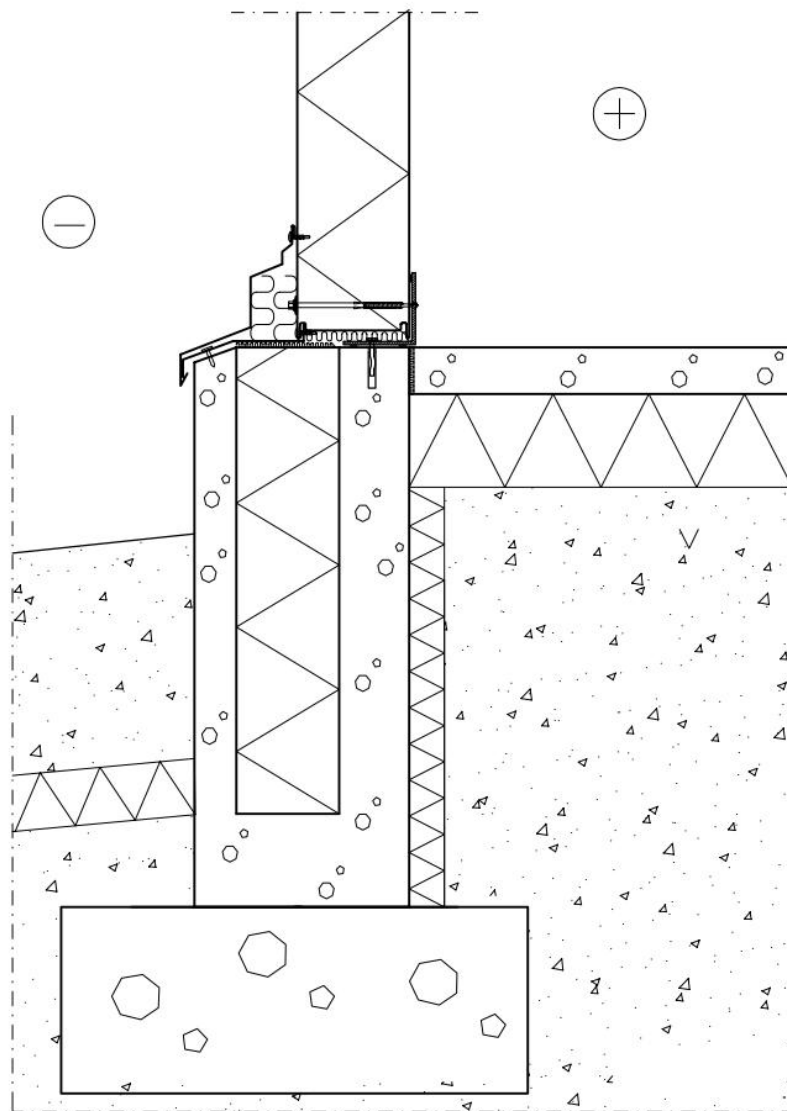
Taulukko L3.4.

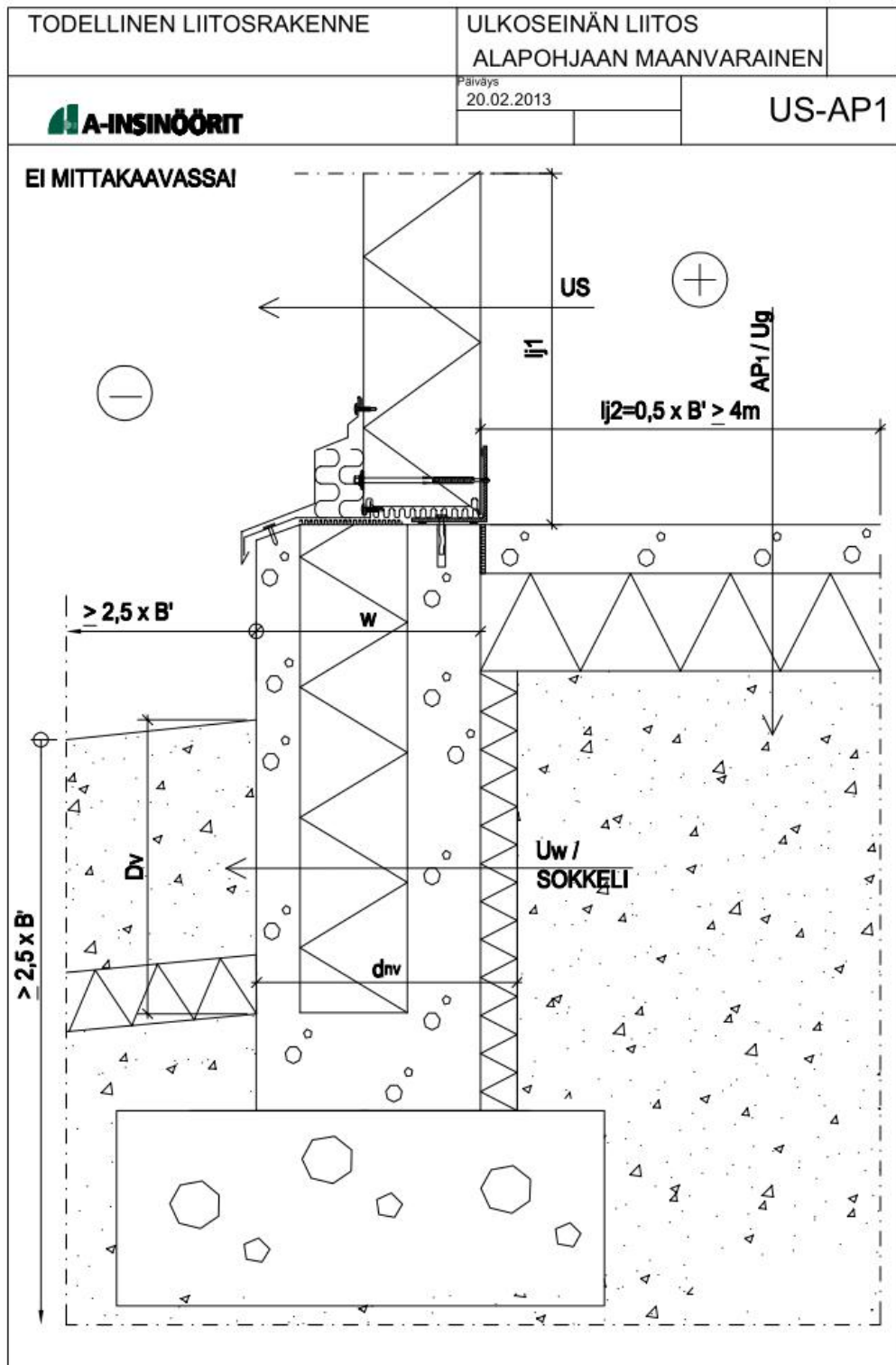
Liitos	Laskettu lisäkonduktanssi [W/mK]	RakMk D5 taulukkoarvo [W/mK]
US-YP	0,1266	0,3

## US-AP1 Ulkoseinän liitos alapohjaan, maanvarainen

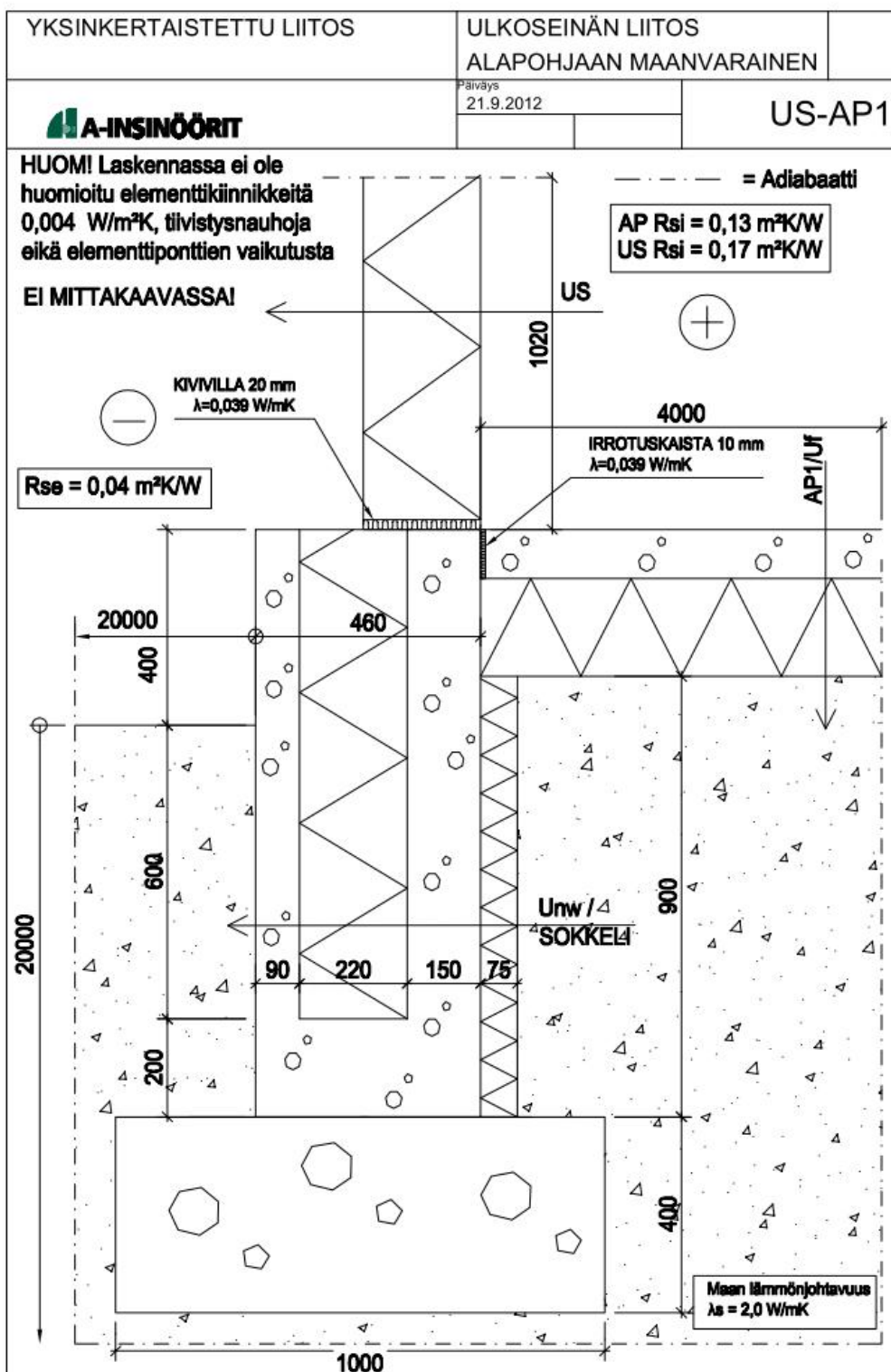
Tässä liitteessä on esitetty liitoksen US-AP1 lisäkonduktanssin laskenta.

Vertailurakenteiden lämmönläpäisykertoimien laskenta perustuu RakMk C4 luonnokseen 16.3.2012 ja liitoksen lisäkonduktanssin laskennassa on sovellettu viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan esimerkin 6.2.1 laskentaperiaatteita sekä esimerkiksi Leivon esityksestä maanvastaiset rakenteet ja ryömintätilalliset rakenteet [22].









## 1.1 Rakenteiden lämmönvastukset ja U-arvot

Ulkoseinärakenteen US, alapohjarakenteen AP1 ja sokkelirakenteen SOKKELI rakennetyypit ks. liite 6 Vertailurakenteet.

Taulukossa L4.1 on esitetty ulkoseinän U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti, WUFI 2D avulla.

Taulukko L4.1.

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{us}$ [m <sup>2</sup> K/W]
US (Ulkoseinäelementti)	0,2412		
Huom! Rakenteessa ei ole huomioitu elementtien kiinnikkeitä eikä elementtiponttien vaikutusta	$\sum R_{us}$		6,2657
	$U_{us}=1/\sum R$		0,1596

Taulukossa L4.2 on esitetty sokkelirakenteen U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti.

Taulukko L4.2.

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{nw}$ [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Ulkokuori</b> (Betoni)	0,09	2,0	0,0450
<b>Lämmöneriste</b> (Solupolystyreeni)	0,220	0,036	6,1111
<b>Sisäkuori</b> (Betoni)	0,150	2,0	0,0750
<b>Lisälämmöneriste</b> (Solupolystyreeni)	0,075	0,039	1,9231
Huom! Sokkelirakenne maata vasten ja pintavastuksia ei ole huomioitu	$\sum R_{nw}$		8,1542
	$U_{nw}=1/\sum R$		0,1226

Taulukossa L4.3 on esitetty alapohjarakenteen U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti.

Taulukko L4.3.

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{AP1}$ [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Betonilaatta</b> (Betoni)	0,100	2,0	0,050
<b>Lämmöneriste</b> (Solupolystyreeni)	0,200	0,036	5,555
Huom! Ilman maakerrosta ja pintavastuksia	$\sum R_{AP1}$		5,605
	$U_{AP1}=1/\sum R$		0,1784

Laskelmissa on käytetty käsin laskettuja lämmönvastuksia muille rakenteille paitsi ulkoseinälle (US), mutta rakenteiden U-arvot tarkistettiin myös WUFI:lla ja tulokset vastasivat riittävällä tarkkuudella käsin laskemalla saatuja tuloksia.

#### 1.1.1 Maassa tapahtuvan lämmönsiirron huomioiminen

Maassa tapahtuvan lämmönsiirron kolmiulotteisuus otetaan huomioon laskemalla lattiarakenteelle suhteellinen lattiamitta  $B'$  RakMK C4 mukaan.

Tämän työn alapohjatarkasteluissa on sovellettu Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan arvoja sillä tässä työssä ei tutkittu tietyn rakennuksen rakenteita, jolloin todellisia mittoja ei ollut käytettävissä.

Alapohjan karakteristinen leveys  $B'$  lasketaan kaavalla

$$B' = A / (0,5 \cdot P)$$

Jossa,

A	Rakennuksen pohjan pinta-ala, m <sup>2</sup>
P	Rakennuksen ulkoseinien muodostaman piirin kokonaispituus, m

Tässä työssä oletuksena (viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaisesti)

$$B' = 8 \text{ m}$$

### 1.1.2 Maanvastaisen alapohjan lämmönläpäisykerroin $U_f$

Maanvastaisen alapohjan ekvivalentti paksuus  $d_t$  lasketaan RakMK C4 luonnos 2012 mukaisesti siten, että seinän paksuutena  $w$  käytetään perusmuurin paksuutta alapohjalaatan kohdalla.

Alapohjalaatan ekvivalentti paksuus:

$$d_t = w + \lambda_s \cdot (R_{si} + R_f + R_{se}) = 0,460 \text{ m} + 2,0 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot \left( 0,17 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 5,605 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \right) = 12,090 \text{ m}$$

Jossa,

$w$  Sokkelin paksuus alapohjalaatan kohdalla, m

$\lambda_s$  Maan lämmönjohtavuus W/mK

$$d_t \geq B' \rightarrow \text{Laatta on hyvin eristetty}$$

Joten alapohjan lämmönläpäisykerroin lasketaan RakMk C4 mukaan kaavalla

$$U_f = \frac{\lambda_s}{0,457 \cdot B' + d_t} + \frac{2 \cdot \psi_{ge}}{B'}$$

Perusmuurin pystysuuntaisen lämmöneristyksen huomioon ottava viivamainen lisäkonduktanssi  $\psi_{gev}$  lasketaan kaavalla

$$\psi_{gev} = -\frac{\lambda_s}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot D_v}{d_t} + 1 \right) - \ln \left( \frac{2 \cdot D_v}{d_t + d'_v} + 1 \right) \right]$$

Jossa,

$\lambda_s$	Pohjamaan lämmönjohtavuus W/mK
$D_v$	Sokkelin lämmöneristeen korkeus maanpinnan alapuolella, m
$d'_v$	Lattiarakenteen reunalla olevan pystysuuntaisen eristeen ekvivalentti paksuus, m

$$d'_v = \lambda_s \cdot \left( R_{nw} - \frac{d_{nw}}{\lambda} \right) = 2,0 \text{ W/mK} \cdot \left( 8,154 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} - \frac{0,535 \text{ m}}{2,0 \text{ W/mK}} \right) = 15,773 \text{ m}$$

$\lambda_s$	Pohjamaan lämmönjohtavuus W/mK
$R_{nw}$	Sokkelin lämmönvastus, ilman pintavastuksia ja maakerrosta, m <sup>2</sup> K/W
$d_{nw}$	Perusmuurin paksuus, m

$$\psi_{gev} = -\frac{2,0}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot 0,6 \text{ m}}{12,090 \text{ m}} + 1 \right) - \ln \left( \frac{2 \cdot 0,6 \text{ m}}{12,090 \text{ m} + 15,773 \text{ m}} + 1 \right) \right] = -\frac{2,0}{\pi} [\ln(1,099) - \ln(1,043)] = -0,0333 \text{ W/mK}$$

$$U_f = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t} + \frac{2 \cdot \psi_{ge}}{B'} = \frac{2,0 \text{ W/mK}}{0,457 \cdot 8 \text{ m} + 12,090 \text{ m}} + \frac{2 \cdot (-0,0333 \frac{\text{W}}{\text{mK}})}{8 \text{ m}} = 0,119 \text{ W/m}^2\text{K}$$

## 1.2 Liitoksen lisäkonduktanssi

Rakenneliitos on mallinnettu WUFI 2D ohjelmalla siten, että rakenteiden materiaaliarvoina on käytetty samoja arvoja kuin vertailurakenteen U-arvojen laskennassa (taulukot L4.1-L4.3).

Taulukossa L4.4 on esitetty numeerisesti WUFI:lla määritetty ulkoseinän ja maanvaraisen alapohjan keskimääräiset lämpövirrat ja lämpövirrat kerrottuna rakenteen mitalla  $l_j$ . Arvoista saadaan laskettua liitoksen kytkentäkerroin  $L_{2D}$

Taulukko L4.4.

Rakenne	Rakenteen mitta $l_j$ [m]	Keskimääräinen lämpövirta $\Phi$ [W/m <sup>2</sup> K]	Lämpövirta · $l_j$ $\Phi \cdot l_j$ [W/mK]
US	1,02	0,1809	0,1845
AP1	4,0	0,1107	0,4428
Liitoksen lämpötekkinen kytkentäkerroin = $L_{2D}$			<b>0,6273</b>

Liitoksen lämpötekkinen kytkentäkerroin lasketaan kaavalla

$$L_{2D} = \frac{\sum \Phi l_j}{\theta_i - \theta_e} = \frac{(0,1809 \cdot 1,02 \text{ m} + 0,1107 \cdot 4,0 \text{ m})}{1\text{K} - 0\text{K}} = 0,6273 \text{ W/mK}$$

jossa,

$\theta_i$  sisälämpötila, K

$\theta_e$  ulkolämpötila, K

Liitoksen kytkentäkertoimesta vähennetään seinän ja alapohjan U-arvoilla lasketut lämpövirrat

$$\psi = L_{2D} - l_{j1} \cdot U_{US} - 0,5 \cdot B' \cdot U_f = 0,6273 \frac{\text{W}}{\text{mK}} - 1,02 \text{ m} \cdot 0,1596 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - 0,5 \cdot 8 \text{ m} \cdot 0,11868 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,6273 \frac{\text{W}}{\text{mK}} - 0,6375 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = -0,0105 \text{ W/mK}$$

Jossa,

$U_{US}$  Ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$U_g$  Alapohjarakenteen rakenteen U-arvo, W/m<sup>2</sup>K

$l_1$  US rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

$l_2$  AP1 rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

Taulukossa L4.5 on esitetty vertailuna laskettu lisäkonduktanssin arvo sekä taulukon vertailuarvo

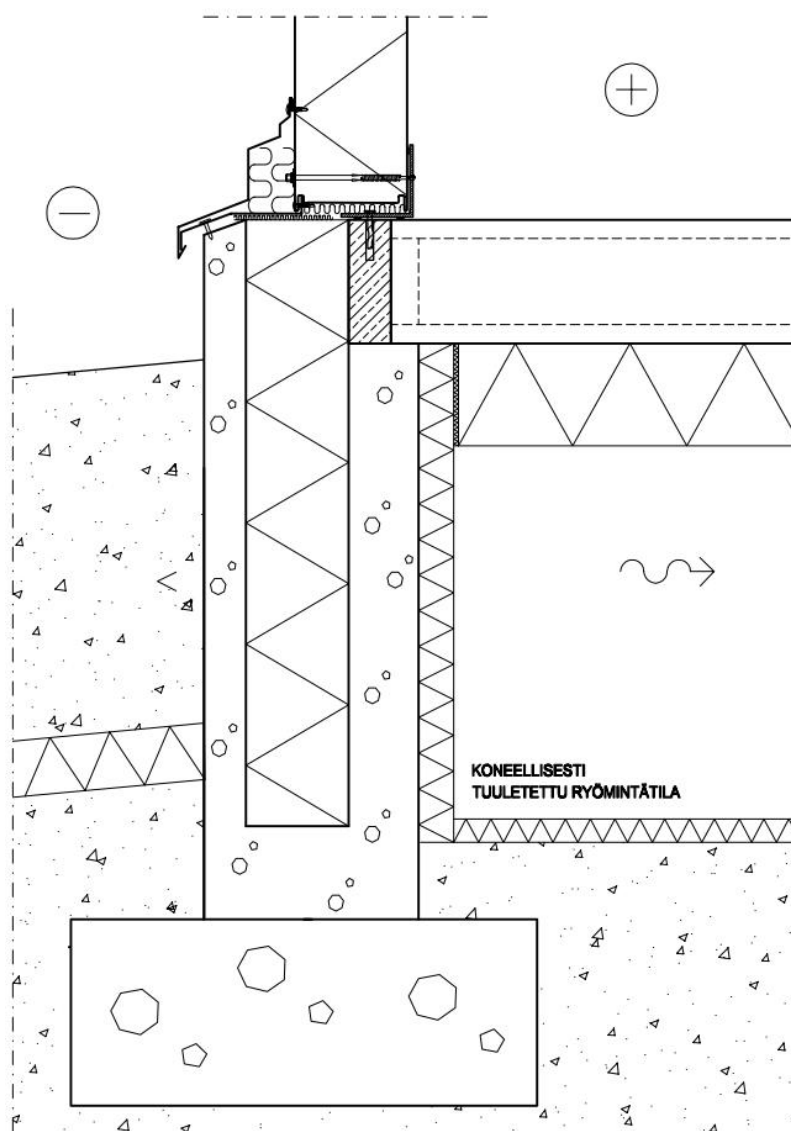
Taulukko L4.5.

Liitos	Laskettu lisäkonduktanssi [W/mK]	RakMk D5 taulukkoarvo [W/mK]
US-AP1	-0,0105	0,5

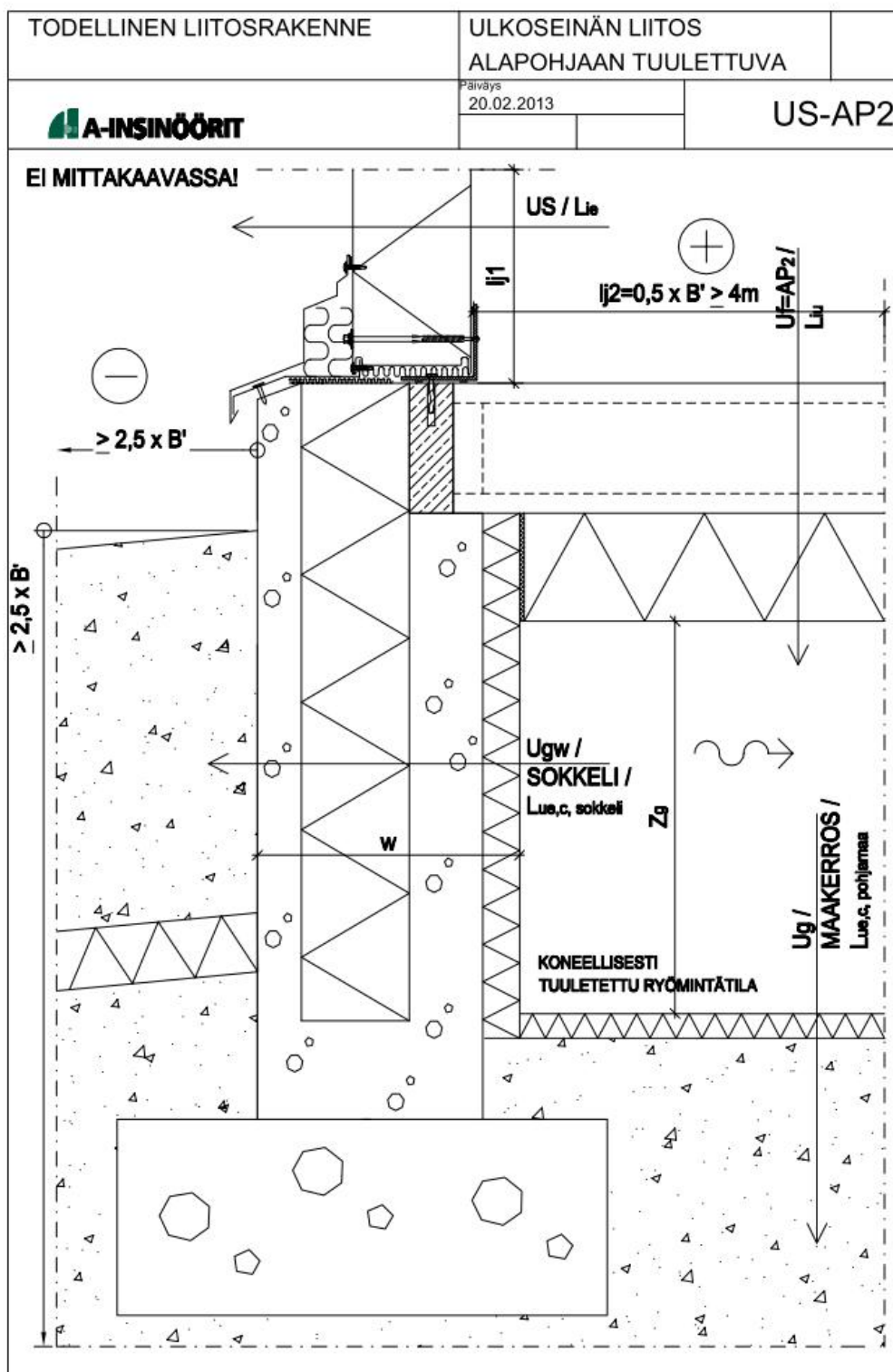
## US-AP2 Ulkoseinän liitos alapohjaan, tuulettuva

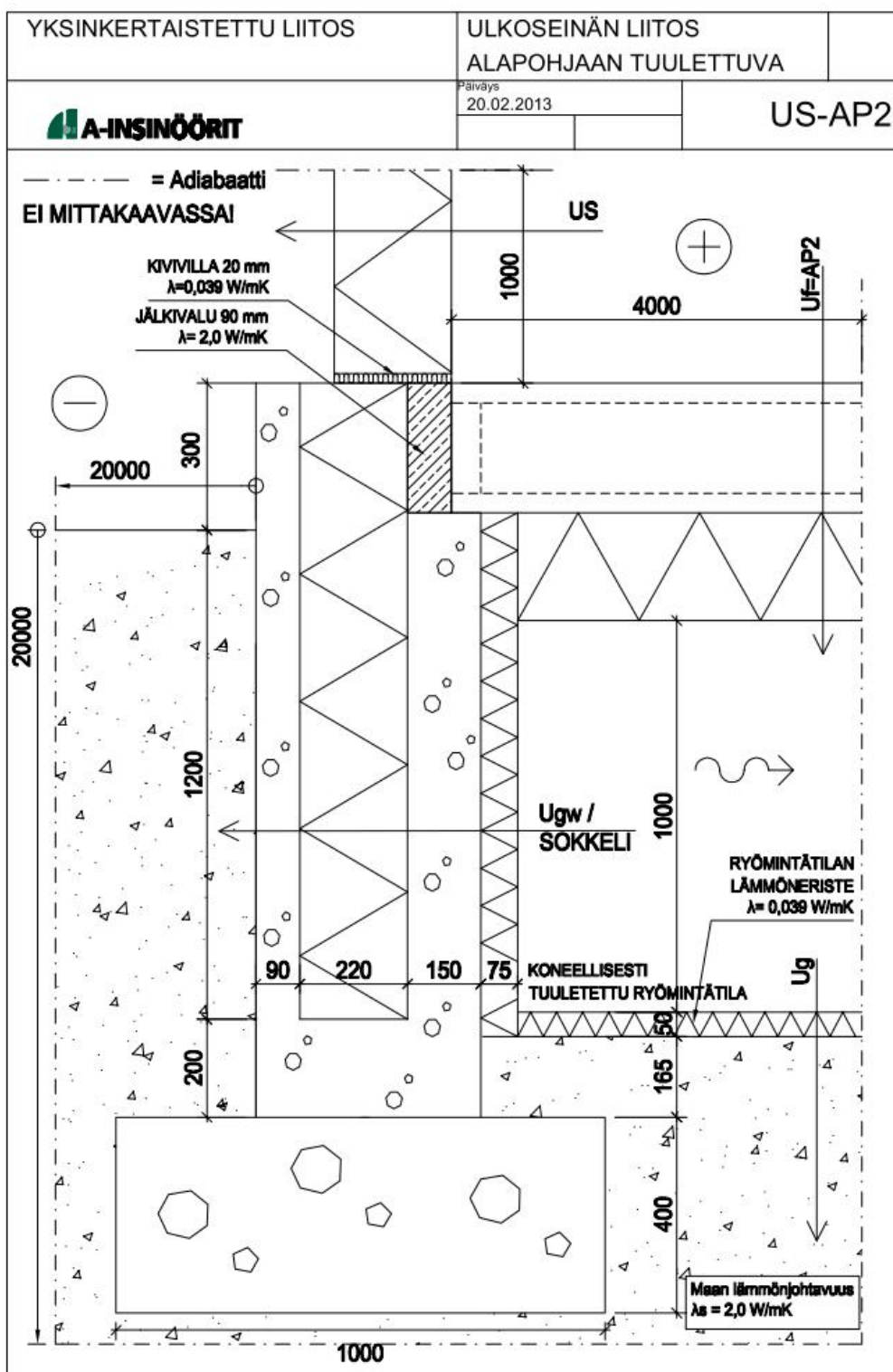
Tässä liitteessä on esitetty liitoksen US-AP2 lisäkonduktanssin laskenta.

Vertailurakenteiden lämmönläpäisykertoimien laskenta perustuu RakMk C4 luonnokseen 16.3.2012 ja liitoksen lisäkonduktanssin laskennassa on sovellettu viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan esimerkin 6.2.2 laskentaperiaatteita sekä esimerkiksi Leivon esityksestä maanvastaiset rakenteet ja ryömintätilalliset rakenteet [22].









## 1.1 Rakenteiden lämmönvastukset ja U-arvot

Ulkoseinärakenteen US, alapohjarakenteen AP2 ja sokkelirakenteen SOKKELI rakennetyypit ks. liite 6 Vertailurakenteet.

Taulukossa L5.1 on esitetty ulkoseinän U-arvo RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti, WUFI 2D avulla

Taulukko L5.1

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{us}$ [m <sup>2</sup> K/W]
US (Ulkoseinäelementti)	0,2412		
Huom! Rakenteessa ei ole huomioitu elementtien kiinnikkeitä eikä elementtiponttien vaikutusta	$\sum R_{us}$		6,2657
	$U_{us}=1/\sum R$		0,1596

Taulukossa L5.2 on esitetty sokkelirakenteen U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti

Taulukko L5.2

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{gw}$ [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Ulkokuori</b> (Betoni)	0,09	2,0	0,045
<b>Lämmöneriste</b> (Solupolystyreeni)	0,220	0,036	6,111
<b>Sisäkuori</b> (Betoni)	0,150	2,0	0,075
<b>Lisälämmöneriste</b> (Solupolystyreeni)	0,075	0,039	1,923
Huom! Sokkelirakenne maata vasten ja pintavastuksia ei ole huomioitu	$\sum R_{gw}$		8,154
	$U_{gw}=1/\sum R$		0,123

Taulukossa L5.3 on esitetty alapohjarakenteen U-arvo laskettuna RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti

Taulukko L5.3

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_{AP2}$ [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Pintavastus <math>R_{si}</math></b>			0,17
<b>Ontelolaatta</b> (Betoni)	0,265	2,0	0,133
<b>Lämmöneriste</b> (Solupolystyreeni)	0,220	0,036	6,111
<b>Pintavastus <math>R_{se}</math></b>			0,04
		$\sum R_{AP2}$	6,454
		$U_f = U_{AP2} = 1/\sum R$	0,155

Taulukossa L5.4 on esitetty ryömintätilan pohjan U-arvo, RakMk C4 luonnos 2012 mukaisesti

Taulukko L5.4

Rakennekerros	Kerrospaksuus [m]	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/mK]	Lämmönvastus $R_g$ [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Lämmöneriste</b> (Solupolystyreeni)	0,05	0,039	1,282
Huom! Pintavastuksia ja maakerrosta ei ole huomioitu		$\sum R_g$	1,282
		$U_g = 1/\sum R_g$	0,780

Sokkelirakenteessa ei ole suoraan ulkoilmaa vasten olevaa rakennusosaa, jolloin  $R_{w2}=0$  m<sup>2</sup>K/W

Laskelmissa on käytetty käsin laskettuja lämmönvastuksia muille rakenteille paitsi ulkoseinälle (US), mutta rakenteiden U-arvot tarkistettiin myös WUFI:lla ja tulokset vastasivat riittävällä tarkkuudella käsin laskemalla saatuja tuloksia.

#### 1.1.1 Maassa tapahtuvan lämmönsiirron huomioiminen

Maassa tapahtuvan lämmönsiirron kolmiulotteisuus otetaan huomioon laskemalla lattiarakenteelle suhteellinen lattiamitta B' RakMK C4 mukaan.

Tämän työn alapohjatarkasteluissa on sovellettu Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan arvoja sillä tässä työssä ei tutkittu tietyn rakennuksen rakenteita, jolloin todellisia mittoja ei ollut käytettävissä.

Alapohjan karakteristinen (lattian leveys) leveys B' lasketaan kaavalla

$$B' = A / (0,5 \cdot P)$$

Jossa,

A                      Rakennuksen pohjan pinta-ala, m<sup>2</sup>

P                      Rakennuksen ulkoseinien muodostaman piirin kokonaispituus, m

Tässä työssä oletuksena (viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaisesti)

$$B' = 8 \text{ m}$$

$$A = 4 \text{ m}^2$$

$$P = 1 \text{ m}$$

#### 1.2 Tuuletetun ryömintätilallisen alapohjan lämmönläpäisykerroin U lasketaan kaavalla

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x}$$

Jossa,

$U$	Ryömintätilan alapohjan lämmönläpäisykerroin, $W/m^2K$
$U_f$	Lattiarakenteen (AP2) lämmönläpäisykerroin, $W/m^2K$
$U_g$	Ryömintätilan ja ympäröivän maan yhdistetty lämmönläpäisykerroin, $W/m^2K$
$U_x$	Ryömintätilan ekvivalentti lämmönläpäisykerroin, $W/m^2K$

Ryömintätilan maanvastaisen sokkelin ekvivalentti paksuus:

$$d_{gw} = \lambda_s \cdot (R_{si} + R_{gw} + R_{se}) = 2,0 \frac{W}{mK} \cdot \left( 0,13 \frac{m^2K}{W} + 8,154 \frac{m^2K}{W} + 0,04 \frac{m^2K}{W} \right) = 16,648 m$$

Jossa,

$\lambda_s$  Pohjamaan lämmönjohtavuus,  $W/mK$

Ryömintätilan pohjan ekvivalentti paksuus:

$$d_g = w + \lambda_s \cdot (R_{si} + R_g + R_{se}) = 0,535m + 2,0 \frac{W}{mK} \cdot \left( 0,17 \frac{m^2K}{W} + 1,282 \frac{m^2K}{W} + 0,04 \frac{m^2K}{W} \right) = 3,519 m$$

Jossa,

$w$  Maanvastaisen sokkelin paksuus ryömintätilan pohjalla

Ryömintätilan pohjan, ryömintätilan sokkelin ja ryömintätilaa ympäröivän maan lämmönläpäisykerroin lasketaan (RakMk C4 mukaan)

$$z_g > 0,5m$$

$$U_g = U_{gf} + \frac{z_g P U_{gw}}{A}$$

Ryömintätilan pohjan lämmöneristeen ja alapuolisen maan yhdistetty lämmönläpäisykerroin

$$U_{gf} = \frac{2 \cdot \lambda_s}{\pi \cdot B' + d_g + 0,5 \cdot z_g} \cdot \ln \left( \frac{\pi \cdot B'}{d_g + 0,5 \cdot z_g} + 1 \right) = \frac{2 \cdot 2,0 \frac{W}{mK}}{\pi \cdot 8m + 3,519 m + 0,5 \cdot 1,0m} \cdot \ln \left( \frac{\pi \cdot 8 m}{3,519m + 0,5 \cdot 1,0 m} + 1 \right) = 0,2719 \frac{W}{m^2K}$$

Maanvastaisen sokkelin ja viereisen maan yhdistetty lämmönläpäisykerroin

$$d_g \geq d_{gw}$$

$$U_{gw} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z_g} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_g}{d_g + z_g}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_g}{d_{gw}} + 1\right) = \frac{2 \cdot 2,0 \frac{W}{mK}}{\pi \cdot 1,0m} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 3,519m}{3,519m + 1,0m}\right) \cdot \ln\left(\frac{1,0m}{16,684m} + 1\right) = 0,1029 \frac{W}{m^2K}$$

$$U_g = U_{gf} + \frac{z_g P U_{gw}}{A} = 0,2719 \frac{W}{m^2K} + \frac{1,0m \cdot 1,0m \cdot 0,1029 \frac{W}{m^2K}}{4} = 0,2976 \frac{W}{m^2K}$$

Koneellisesti tuuletetun ryömintätilaisen alapohjan ekvivalentti lämmönläpäisykerroin  $U_x$  lasketaan kaavalla

$$U_x = \frac{2 \cdot h \cdot U_w}{B'} + \frac{V \cdot c_{pa} \rho_a}{A} = 0 + \frac{0,000555m^3/s \cdot 1000J/kgK \cdot 1,2kg/m^3}{4} = 0,1667 \frac{W}{m^2K}$$

Jossa,

$h$	Ympäröivän maan pinnan yläpuolella olevan perusmuurin keskimääräisen korkeus, m
$B'$	Suhteellinen lattiamitta, m
$U_w$	Ympäröivän maan pinnan yläpuolella olevan perusmuurin lämmönläpäisykerroin, $W/m^2K$
$V$	Koneellisen ilmanvaihdon tilavuusvirta, $m^3/s$
$c_{pa}$	Ilman ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa, $J/kgK$
$\rho_a$	Ilman tiheys, noin $1,2 kg/m^3$ , $kg/m^3$
$A$	Lattiarakenteen pinta-ala, $m^2$

$$V = n \cdot \frac{V}{3600s} = 0,5 \cdot \frac{(1m \cdot 4m \cdot 1m)}{3600s} = 0,000555 m^3/s$$

Sokkelirakenteessa ei ole suoraan ulkoilmaa vasten olevaa rakennusosaa

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_f} + \frac{1}{U_g + U_x} = 6,4536 \frac{m^2K}{W} + \frac{1}{0,2976 \frac{W}{m^2K} + 0,1667 \frac{W}{m^2K}} = 8,6073 \frac{m^2K}{W}$$

Alapohjan lämmönläpäisykertoimeksi saadaan siis

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{8,6073} \frac{m^2K}{W} = 0,1162 W/m^2K$$

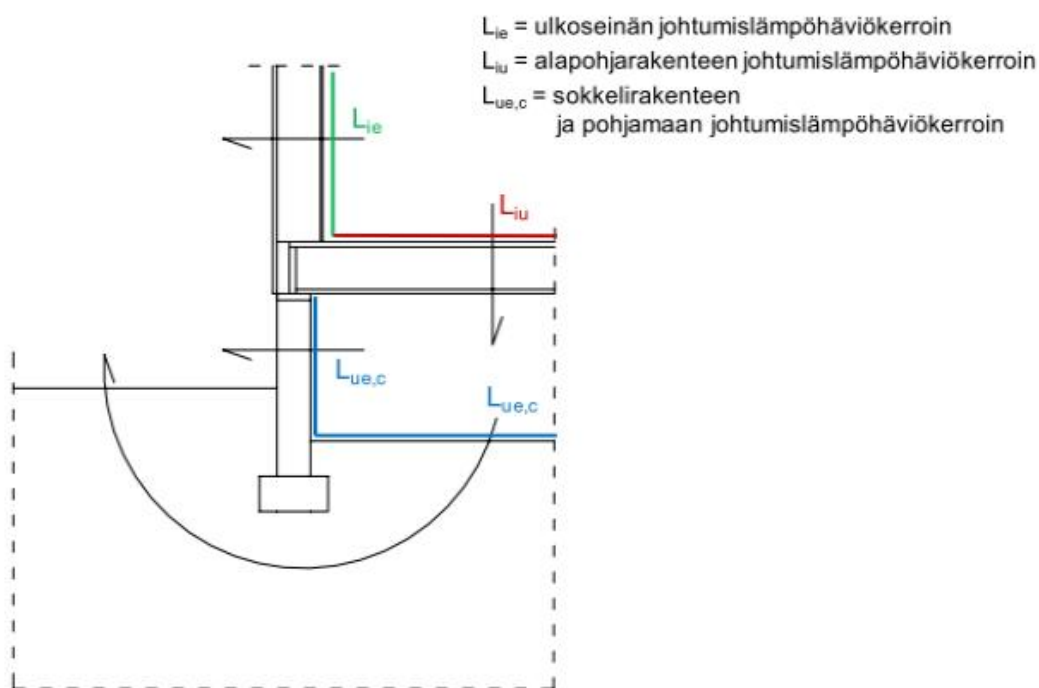
1.3 Liitoksen kytkentäkertoimen  $L_{2D}$  määrittäminen

Taulukko L5.5

Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas

Taulukko 6. Kolme ryömintätilaisen alapohjan laskentatapausta.

Laskentatapa	Sisälämpötila $\theta_i$	Ukolämpötila $\theta_e$	R-tilan lämpötila $\theta_u$	Tulos
1	1	0	0	$L_1 = L_{ie} + L_{iu}$
2	0	1	0	$L_2 = L_{ie} + L_{ue,c}$
3	0	0	1	$L_3 = L_{iu} + L_{ue,c}$



Kuva 6. Ryömintätilallisen alapohjarakenteen ja ulkoseinän liitoksen lisäkonduktanssin määrittämisessä tarvittavat johtumislämpöhäviökertoimet  $L_{ie}$ ,  $L_{iu}$  ja  $L_{ue,c}$ .

Kuva L5.1. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas, liitoksen lisäkonduktanssin määrittäminen

Taulukossa L5.6 on rakenteen keskimääräiset lämpövirrat WUFI:sta kerrottuna rakenteen pituudella



Taulukko L5.6

Laskentatapaus	$L_{ie}$ [W/mK]	$L_{iu}$ [W/mK]	$L_{ue,c,sokkeli}$ [W/mK]	$L_{ue,c,pohjamaa}$ [W/mK]	$\sum L_{ue,c}$ [W/mK]	$L_i$ [W/mK]
<b>L1</b>	0,1632	0,8946	0	0	0	1,0577
<b>L2</b>	0,1536	0	0,1622	0,7975	0,9597	1,1133
<b>L3</b>	0	0,7555	0,2848	0,8222	1,1070	1,8625

$$L_{iu} = 0,5 \cdot (L_1 - L_2 + L_3) = 0,5 \cdot (1,0577 - 1,1133 + 1,8625) = 0,9035 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ie} = 0,5 \cdot (L_1 + L_2 - L_3) = 0,5 \cdot (1,0577 + 1,1133 - 1,8625) = 0,1543 \text{ W/(mK)}$$

$$L_{ue,c} = 0,5 \cdot (L_2 + L_3 - L_1) = 0,5 \cdot (1,1133 + 1,8625 - 1,0577) = 0,9590 \text{ W/(mK)}$$

Koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama lisälämpöhäviö ( $n=0,5$  1/h)

Ilmavirta

$$V = n \cdot \frac{V}{3600 \text{ s}} = 0,5 \cdot \frac{(1\text{m} \cdot 4\text{m} \cdot 1\text{m})}{3600 \text{ s}} = 0,000555 \text{ m}^3/\text{s}$$

Jossa,

$n$  Ilman vaihtuvuus, 1/h

$V$  Ryömintätilan tilavuus

$$L_{ue,v} = \frac{\rho_a c_{pa} V}{P} = \frac{1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 0,000555 \text{ m}^3/\text{s}}{1\text{m}} = 0,6672 \text{ W/mK}$$

Ryömintätilan ja ulkoilman välinen kokonaislämpövirta saadaan kaavasta

$$L_{ue} = L_{ue,c} + L_{ue,v} = 0,9590 \frac{\text{W}}{\text{mK}} + 0,6672 \frac{\text{W}}{\text{mK}} = 1,6262 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

Liitoksen kytkentäkerroin lasketaan kaavalla

$$L_{2D} = \left( \frac{L_{iu} \cdot L_{ue}}{L_{iu} + L_{ue}} + L_{ie} \right) = \left( \frac{0,9035 \text{ W/(mK)} \cdot 1,6262 \text{ W/(mK)}}{0,9035 \text{ W/(mK)} + 1,6262 \text{ W/(mK)}} + 0,1543 \text{ W/(mK)} \right) = 0,7351 \text{ W/(mK)}$$

## 1.2 Liitoksen lisäkonduktanssi

Rakenneliitos on mallinnettu WUFI 2D ohjelmalla siten, että rakenteiden materiaaliarvoina on käytetty samoja arvoja kuin vertailurakenteen U-arvojen laskennassa (taulukot L5.1-L5.4).

Liitoksen kytkentäkertoimesta vähennetään seinän ja alapohjan U-arvoilla lasketut lämpövirrat

$$\Psi = L_{2D} - l_1 \cdot U_{US} - 0,5 \cdot B' \cdot U = 0,7351 \frac{W}{mK} - 1,0 m \cdot 0,1596 \frac{W}{m^2K} - 0,5 \cdot 8m \cdot 0,1162 \frac{W}{m^2K} = 0,7351 \frac{W}{mK} - 0,6244 \frac{W}{m^2K} = \mathbf{0,1107 W/mK}$$

Jossa,

$U_{US}$	Ulkoseinärakenteen U-arvo, W/m <sup>2</sup> K
$U$	Alapohjarakenteen rakenteen U-arvo, W/m <sup>2</sup> K
$l_1$	US rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m
$l_2$	AP2 rakenteen pituus liitosrakenteen mallissa, m

Taulukossa L5.7 on esitetty vertailuna laskettu lisäkonduktanssin arvo sekä taulukon vertailuarvo

Taulukko L5.7

Liitos	Laskettu lisäkonduktanssi [W/mK]	RakMk D5 taulukkoarvo [W/mK]
US-AP2	0,1107	0,5

## Vertailurakenteet

Tässä liitteessä on esitetty laskennassa käytettyjen vertailurakenteiden rakennetyypit.

VERTAILURAKENNE	ULKOSEINÄ	1:10
	Päiväys 20.02.2013	US

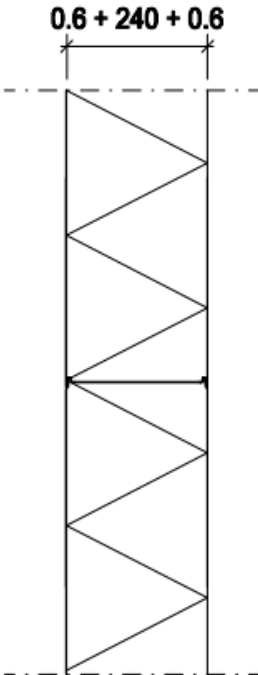
**HUOM!** Laskennassa ei ole huomioitu elementtikiinnikkeitä 0,004 W/m²K, tiivistysnauhoja eikä elementtiponttien vaikutusta

— · — · — = Adiabaatti

Ulkopuolen pintavastus  
 $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

⊖

$0.6 + 240 + 0.6$



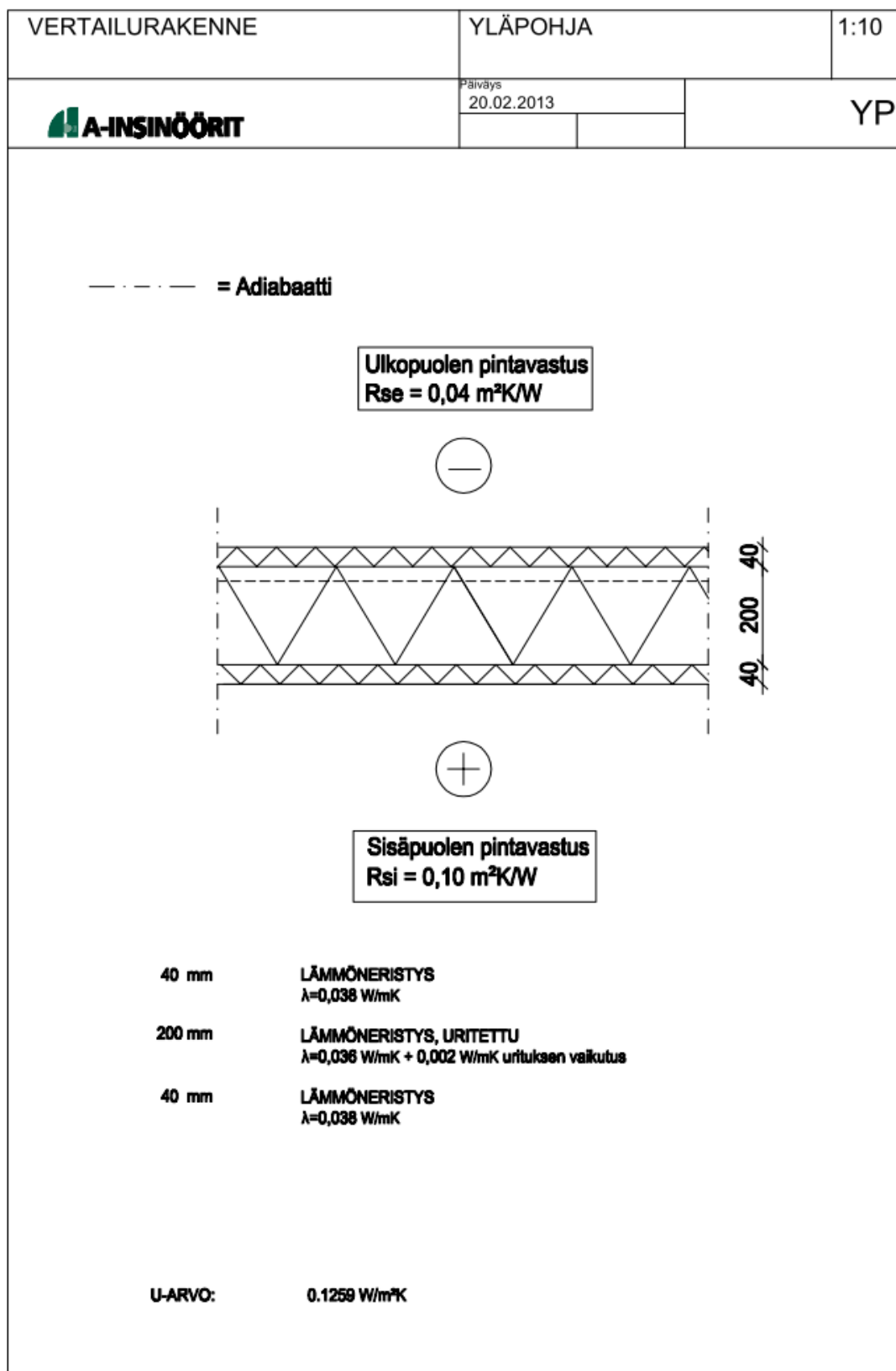
Sisäpuolen pintavastus  
 $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$


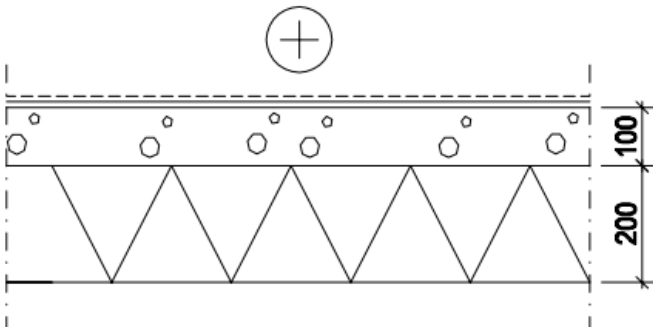
⊕

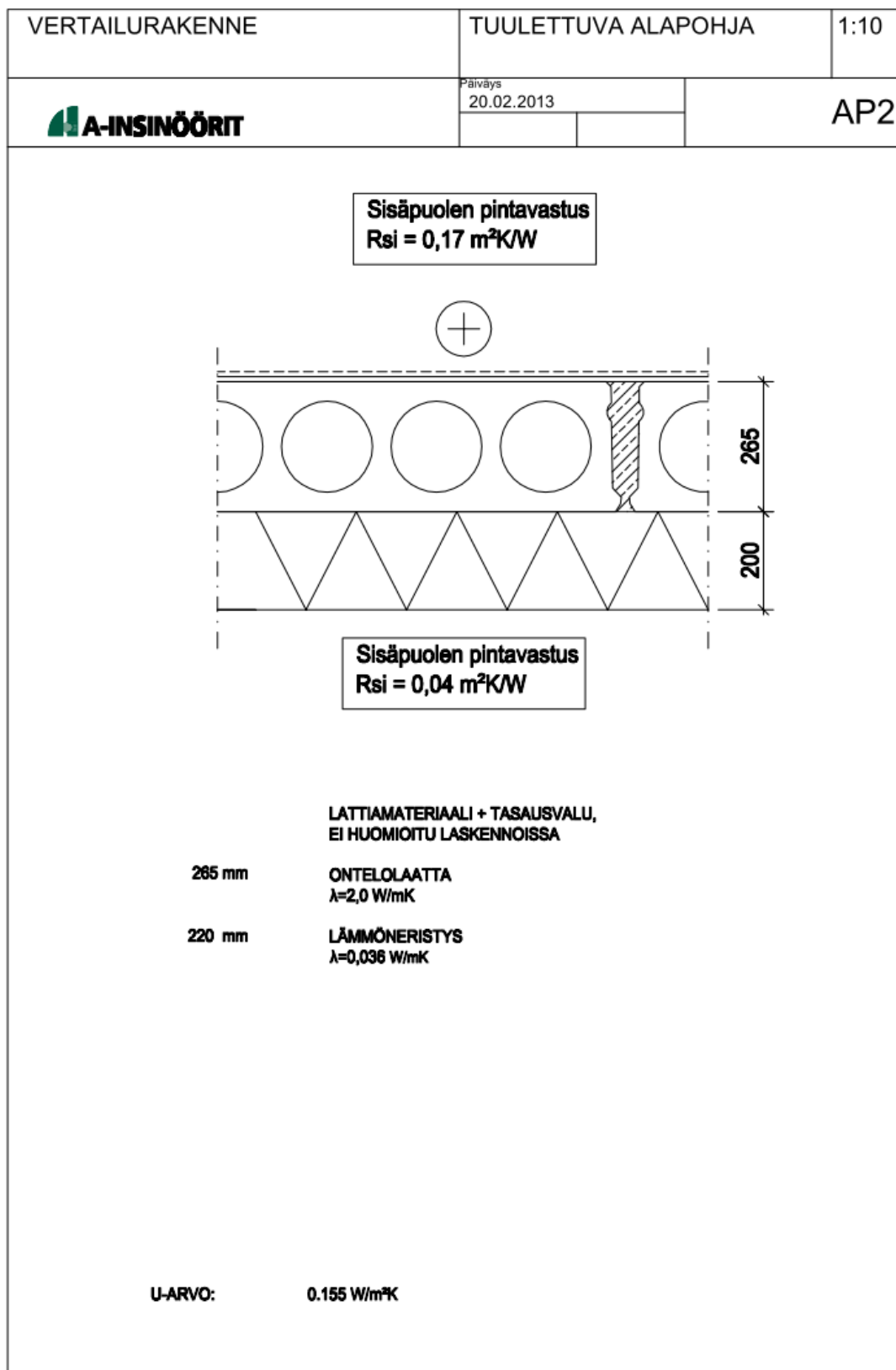
**ULKOSEINÄELEMENTTI**  
Teräsohutelevy-sandwich elementti


0,6 mm	PINTALEVY Teräs, $\lambda = 50 \text{ W/mK}$
240 mm	LÄMMÖNERISTYS Paroc- structural -kivivilla, $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$
0,6 mm	PINTALEVY Teräs, $\lambda = 50 \text{ W/mK}$

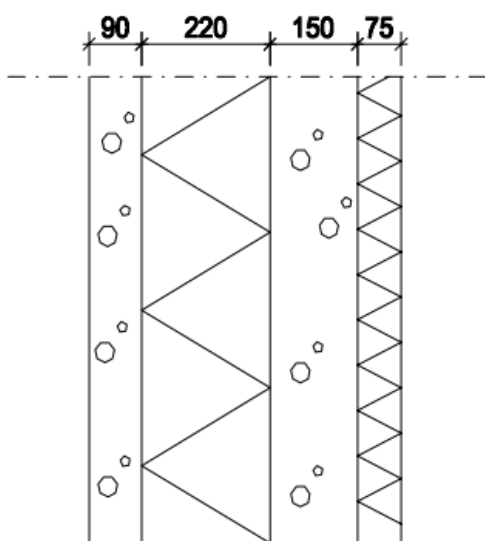
**U-ARVO:** 0.1596 W/m²K



VERTAILURAKENNE	MAANVARAINEN ALAPOHJA	1:10
	Päiväys 20.02.2013	AP1
		
100 mm	BETONILAATTA, BETONI $\lambda=2,0 \text{ W/mK}$	
200 mm	LÄMMÖNERISTYS $\lambda=0,036 \text{ W/mK}$	
	MAAKERROKSET	
U-ARVO:	0.1784 W/m²K	



VERTAILURAKENNE		SOKKELI		1:10
		Päiväys 20.02.2013		SOKKELI



90 mm	ULKOKUORI, BETONI $\lambda=2,0 \text{ W/mK}$
220 mm	LÄMMÖNERISTYS $\lambda=0,036 \text{ W/mK}$
150 mm	SISÄKUORI, BETONI $\lambda=2,0 \text{ W/mK}$
75 mm	LISÄLÄMMÖNLÄMMÖNERISTYS $\lambda=0,039 \text{ W/mK}$

U-ARVO:

0.1226 W/m²K